

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION**

M. Ing.

**PAR
ALAN CARTER**

**RHÉOLOGIE EN PETITE DÉFORMATION DES ENROBÉS BITUMINEUX ET
MESURE DE LEUR RÉSISTANCE À BASSE TEMPÉRATURE À PARTIR DE
L'ESSAI TSRSTS**

MONTREAL, AOÛT 2002

©Droits réservés de Alan Carter

RHÉOLOGIE EN PETITE DÉFORMATION DES ENROBÉS BITUMINEUX ET MESURE DE LEUR RÉSISTANCE À BASSE TEMPÉRATURE À PARTIR DE L'ESSAI TSRSTS

Alan Carter

Résumé

Cette recherche a comme objectifs de mettre au point un essai de caractérisation de la rhéologie qui est représentatif du comportement de l'enrobé dans la chaussée et de caractériser la résistance à basse température de ces mêmes enrobés avec l'essai TSRSTS.

Pour la mesure de la rhéologie, un essai cyclique sinusoïdal en tension-compression avec une déformation imposée de $30\mu\text{m}$ à diverses fréquences (de 0,03Hz à 15Hz) et températures (-30°C à 30°C) afin de mesurer le module complexe a été sélectionné. Pour la résistance à basse température, c'est l'essai de retrait thermique empêché avec un taux de refroidissement de 10°C/h qui a été sélectionné.

Deux enrobés ont été testés, soit EG-10A (10% de filler) et EG-10B (7% de filler). Les essais de retrait thermique empêché et de mesure du module complexe ont donné des résultats qui concordent avec la revue de la documentation.

CE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

- **M. Daniel Perraton, directeur du mémoire**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **M. Francois Brissette, professeur**
Département de génie de la construction à l'école de technologie supérieure
- **M. Michel Paradis, Responsable du secteur enrobés bitumineux**
Ministère des transports du Québec - Laboratoire des chaussées
Service des matériaux d'infrastructures

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET UN PUBLIC

LE 12 JUILLET 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RHÉOLOGIE EN PETITE DÉFORMATION DES ENROBÉS BITUMINEUX ET MESURE DE LEUR RÉSISTANCE À BASSE TEMPÉRATURE À PARTIR DE L'ESSAI TSRSTS

Alan Carter

Résumé

Cette recherche a un double objectif. Premièrement, faire une synthèse des connaissances actuelles sur la rhéologie des enrobés bitumineux et sur leur résistance à basse température, et deuxièmement mettre au point un essai de caractérisation de la rhéologie qui est représentatif du comportement de l'enrobé dans la chaussée.

Pour ce faire, des essais de mise au point des appareils que nous avons utilisés ont été nécessaires. Ces essais de mise au point qui comprennent l'étalonnage des cellules de charges, des extensomètres et des thermocouples ont permis de connaître la précision qu'il serait possible d'avoir en plus de fixer les limites techniques de l'utilisation de l'appareillage.

Pour la mesure de la rhéologie, un essai cyclique sinusoïdal en tension-compression avec une déformation imposé de $30\mu\text{m}$ à diverses fréquences (de 0,03Hz à 15Hz) et températures (-30°C à 30°C) afin de mesurer le module complexe a été sélectionné. Pour la résistance à basse température, c'est l'essai de retrait thermique empêché avec un taux de refroidissement de 10°C/h qui a été sélectionné.

L'étape suivante a consisté à confectionner deux enrobés bitumineux contenant un pourcentage de filler différent afin de pouvoir valider les paramètres d'essais choisis précédemment (EG-10A et EG-10B).

Les essais de retrait thermique empêché et de mesure du module complexe ont donné des résultats qui concordent avec la revue de la documentation. Ces deux essais semblent être bien adaptés pour mesurer les caractéristiques des enrobés bitumineux. Par contre, d'autres enrobés devraient être testés afin de revalider les résultats car les essais effectués sur l'enrobé EG-10A ne sont pas très fiables à cause d'une acquisition des données incomplètes.

REMERCIEMENTS

Premièrement, je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton, qui m'a apporté son soutien tout au long du projet.

Je tiens également à remercier le personnel du département de construction, spécialement M. John Lescelleur sans qui la réalisation des essais aurait été beaucoup plus hasardeuse. Je dois aussi remercier Stéphane Faucon-Dumont d'Eurovia, anciennement EJM, qui m'a fait bénéficier de son expérience sur la presse MTS.

Je ne peux passer sous silence le support moral et technique de mes deux joyeux lurons, Mélanie Bertrand et Sébastien Lamothe, qui m'ont accompagné tout au long de ma maîtrise.

Finalement, je me dois de remercier Annie, ma femme, pour ses encouragements tout au long de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xvi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA DOCUMENTATION	3
1.1 L'enrobé	3
1.1.1 Le liant	4
1.1.2 La masse granulaire	5
1.1.3 Le mortier bitumineux, le mastic	6
1.2 Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux	7
1.2.1 Classification des enrobés bitumineux	7
1.2.2 Le comportement mécanique des enrobés bitumineux	8
1.2.3 La rhéologie	9
1.2.3.1 Le comportement élastique	10
1.2.3.2 Le comportement visqueux	11
1.2.3.2.1 Viscoélasticité uniaxiale	13
1.2.3.2.2 Viscoélasticité linéaire (VEL)	14
1.2.3.3 Les modèles rhéologiques simples	16
1.2.4 Le module complexe des enrobés bitumineux	18
1.2.4.1 Représentation du module complexe dans le plan complexe (plan Cole-Cole)	22
1.2.4.2 Représentation du module complexe dans l'espace de Black	22
1.2.4.3 L'énergie dissipée	23
1.2.4.4 Principe d'équivalence temps-température ou fréquence-température	24

1.2.4.5 Les courbes maîtresses (Master curve).....	27
1.2.5 Les essais pour déterminer la rigidité d'un enrobé bitumineux.....	28
1.2.5.1 Mesure du module complexe dans le domaine fréquentiel : les essais cycliques sinusoïdaux.....	28
1.2.5.1.1 L'essai de compression dynamique sinusoïdale.....	29
1.2.5.1.2 L'essai de traction indirecte pour déterminer le module résilient.....	31
1.2.5.1.3 L'essai de flexion sinusoïdale.....	32
1.2.5.2 La mesure du module en fonction du temps : domaine temporel.....	33
1.2.5.2.1 L'essai de traction directe.....	35
1.2.5.3 Comparaison des résultats : module complexe et module sécant.....	35
1.2.5.4 Synthèse des essais de mesure de la rigidité d'un enrobé.....	38
1.2.6 Influence de divers paramètres sur la valeur du module complexe d'un enrobé bitumineux.....	40
1.2.6.1 Les paramètres liés aux conditions d'essais.....	40
1.2.6.2 Les paramètres de constitutions.....	41
1.2.7 Sommaire.....	44
1.3 La performance des enrobés bitumineux à basse température.....	44
1.3.1 La fissuration thermique des enrobés bitumineux.....	45
1.3.1.1 Mécanisme de la fissuration thermique.....	46
1.3.2 Incidence des fissures thermiques.....	48
1.3.3 La température dans l'enrobé.....	49
1.3.4 Facteurs déterminant pour la performance à basse température d'un enrobé bitumineux dans le contexte de la chaussée.....	50
1.3.5 Méthode en laboratoire pour évaluer la performance à basse température d'un enrobé bitumineux : l'essai en retrait thermique empêché.....	50
1.3.5.1 Description et principe de l'essai de TSRSTS.....	51
1.3.5.2 Les résultats de l'essai de retrait thermique empêché.....	52
1.3.5.3 Facteurs déterminant pour la performance à basse température	

de l'enrobé évaluée à partir de l'essai de retrait thermique empêché.....	55
1.3.5.3.1 Les paramètres d'essais.....	55
1.3.5.3.2 Les paramètres de constitutions.....	57
1.3.6 Sommaire.....	61
CHAPITRE 2 : SÉLECTION DU TYPE D'ESSAI, DES PARAMÈTRES D'ESSAIS ET DES CONSTITUANTS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS BITUMINEUX TESTÉS	63
2.1 Introduction.....	63
2.2 Réflexions quant à la sélection du type d'essai.....	63
2.2.1 Mesure des propriétés rhéologiques de l'enrobé.....	64
2.2.2 Résistance à basse température.....	66
2.3 Les paramètres d'essais.....	67
2.3.1 Le module complexe.....	67
2.3.2 L'essai de retrait thermique empêché.....	68
2.4 Sélection des constituants pour la confection des enrobés bitumineux testés.....	68
2.4.1 L'enrobé et ces constituants.....	69
2.4.1.1 Les granulats.....	69
2.4.1.2 Le filler.....	71
2.4.1.3 Le bitume.....	71
CHAPITRE 3: PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	72
3.1 Introduction.....	72
3.2 Phase I.....	75
3.3 Phase II.....	75
3.4 Phase III.....	77
3.5 Phase IV.....	77
CHAPITRE 4 : DESCRIPTIONS DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE.....	78
4.1 Introduction.....	78
4.2 Les matériaux utilisés.....	78

4.2.1 Les granulats	78
4.2.1.1 La granulométrie	80
4.2.2 Le filler	80
4.2.3 Le bitume	81
4.3 La formulation	82
4.4 Les essais de laboratoire	84
4.4.1 La confection et la préparation des éprouvettes	84
4.4.1.1 La confection des enrobés	84
4.4.1.2 Le compactage des plaques d'enrobés bitumineux	85
4.4.1.3 Le carottage des éprouvettes	87
4.4.1.4 Le collage des casques	88
4.4.2 L'essai de retrait thermique empêché : TSRSTS	89
4.4.2.1 La presse	90
4.4.2.2 L'enceinte thermique	90
4.4.2.3 Les extensomètres	91
4.4.2.4 La cellule de charge	93
4.4.2.5 Montage de l'éprouvette dans l'enceinte et déroulement de l'essai de retrait thermique empêché	93
4.4.3 La mesure des propriétés rhéologiques des enrobés : le module complexe	95
4.4.3.1 Les extensomètres	96
4.4.3.2 La cellule de charge	96
4.4.3.3 Déroulement d'un essai	96
4.4.3.3.1 Les fréquences et les températures d'essai	97
4.4.3.4 L'acquisition des données	98
4.5 Aspects métrologique	98
4.5.1 La température dans l'enceinte	99
4.5.2 La précision des extensomètres	100
4.5.3 La précision de la cellule de charge	101
4.5.4 Les paramètres d'asservissement	102
4.5.4.1 P (Proportional gain)	103
4.5.4.2 D (Rate derivative)	104

4.5.4.3 I (Reset integration).....	104
4.5.4.4 F (Feed forward).....	105
CHAPITRE 5: PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	106
5.1 Introduction.....	106
5.2 Les essais de mise au point.....	106
5.2.1 Uniformité de la température à la surface de l'éprouvette.....	106
5.2.1.1 Temps de stabilisation de la température.....	108
5.2.1.2 Homogénéité de la température à la surface de l'éprouvette selon une température de consigne fixe.....	109
5.2.1.3 Homogénéité de la température à la surface de l'éprouvette selon une consigne de température variable, en cours de refroidissement.....	111
5.2.2 La précision des extensomètres.....	113
5.2.2.1 Homogénéité du champ de contrainte en cours d'essai.....	115
5.2.3 Étalonnage de la cellule de charge.....	119
5.2.4 Sommaire des incertitudes.....	121
5.2.5 Les paramètres d'asservissement.....	121
5.2.6 La limite de linéarité du comportement viscoélastique.....	121
5.3 La caractérisation des enrobés testés : module complexe et résistance à basse température.....	123
5.3.1 La résistance à la fissuration thermique.....	123
5.4 La mesure du module complexe.....	126
5.4.1 Résultats des essais de mesure du module complexe.....	127
5.5 Les méthodologies.....	132
CHAPITRE 6 : ANALYSE DES RÉSULTATS.....	135
6.1 Introduction.....	135
6.2 La limite de linéarité du comportement viscoélastique.....	135
6.2.1 Comparaison des deux enrobés.....	137
6.3 Les essais de caractérisation des enrobés bitumineux.....	137
6.3.1 La résistance à la fissuration thermique.....	137
6.3.1.1 Comparaison des deux enrobés.....	138
6.3.1.2 Comparaison avec les résultats de la littérature.....	142

6.3.2 Le module complexe	143
6.3.2.1 Acquisition des données	143
6.3.2.2 Comparaison des deux enrobés	145
6.3.2.3 Les courbes maîtresses	146
6.4 Modèle permettant de décrire la rhéologie de l'enrobé	151
6.4.1 Calcul des paramètres E_0 , E_{infini} , k , h et δ	154
CONCLUSION	157
RECOMMANDATIONS	159
ANNEXES	
1 - Le coefficient de dilatation thermique	161
2 - Procédure de sédimentométrie	164
3 - Préparation des éprouvettes	170
4 - Guide d'utilisation du système d'acquisition de données Teststar II	177
5 - Calcul des incertitudes	191
6 - Paramètres d'asservissements	197
7 - Comparaison des valeurs des normes du module complexe pour les enrobés EG-10A et EG-10B à 30°C, 15°C, 0°C, -15°C et -30°C	199
8 – Méthodologie pour l'essai de TSRSTS et méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe	202
BIBLIOGRAPHIE	209

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Comportement mécanique "type" des enrobés bitumineux, (ϵ) déformation et (N) nombre de chargements (Source : Di Benedetto et de La Roche, 1998).....	9
Figure 1.2 Variation de la norme du module complexe en fonction de la fréquence de chargement et de la température (Source : Di Benedetto et de la Roche 1998).....	12
Figure 1.3 Expériences de recouvrance (a et b) et d'effacement (c et d) (Source : Salençon, 1983).....	14
Figure 1.4 Perte de linéarité en fonction de la déformation imposée (Source : Di Benedetto et de la Roche 1998).....	16
Figure 1.5 Exemple d'éléments purement visqueux « V » et d'éléments non visqueux « EP » (Source : Neifar 1997).....	17
Figure 1.6 Modèles de Maxwell (a) et de Kelvin-Voigt (b) utilisés pour décrire les comportements viscoélastique (Source : Salençon 1983).....	18
Figure 1.7 Définition du module complexe : évolution des efforts (contraintes) et déplacements (déformations) pour un matériau viscoélastique linéaire (Source : Di Benedetto, 1998).....	19
Figure 1.8 Représentation vectorielle de la partie réelle et de la partie imaginaire du module complexe (Source : Aklonis et MacKnight 1983).....	20
Figure 1.9 Répartition des charges en fonction de la rigidité de l'enrobé (Adapté de Doucet et coll 2000).....	21
Figure 1.10 Exemple de courbes d'un essai de module complexe dans le plan Cole-Cole (Adapté de Di Benedetto et de la Roche 1998).....	22
Figure 1.11 Exemple de courbes d'un essai de module complexe dans un espace Black (Source : de Di Benedetto et de la Roche 1998).....	23
Figure 1.12 Énergie dissipée et énergie emmagasinée, en fonction du type de matériau testé, représentée dans la relation contrainte-déformation (Source : Soltani 1998).....	24

Figure 1.13	Exemple d'isothermes et d'une courbe maîtresse du module complexe (Source : Soltani 1998).....	25
Figure 1.14	Pivot de translation pour trouver la courbe maîtresse.....	26
Figure 1.15	Graphique de l'évolution du facteur de translation avec la température.....	27
Figure 1.16	Courbe type de l'évolution la contrainte sinusoïdale au sein de l'éprouvette toujours en compression effectuée selon la norme ASTM D 3497-79.....	30
Figure 1.17	Déformation résultante de la compression cyclique sinusoïdale (Adapté de Perraton et coll 2001).....	30
Figure 1.18	Montage pour essai de traction indirecte.....	32
Figure 1.19	Schéma du montage de l'éprouvette trapézoïdale collée à son socle.....	33
Figure 1.20	Fissure thermique dans un enrobé bitumineux (Source : Durand et Doré 1993).....	45
Figure 1.21	Microfissure créée par le retrait thermique du bitume (Source : Moran 1998).....	47
Figure 1.22	Courbe type d'un essai de retrait empêché (Source : Jung et Vinson 1994).....	53
Figure 1.23	Interaction entre les granulats et le bitume (Adapté de Perraton et coll 2001).....	54
Figure 1.24	Influence du taux de refroidissement sur la température et la tension de rupture (Source : Jung et Vinson 1994).....	56
Figure 1.25	Influence de l'âge de l'enrobé sur la température de rupture (Source : Jung et Vinson 1994).....	58
Figure 1.26	Effet du volume des vides sur la fissuration thermique lors d'un TSRSTS (Adapté de Jung et Vinson 1994).....	60
Figure 2.1	Déformation à la base de la couche de roulement, au point A, lors du passage d'une charge (Adapté de Doucet et coll 2000).....	65
Figure 3.1	Processus expérimental.....	74
Figure 4.1	Courbes granulométriques des enrobés bitumineux étudiés dans le programme expérimental.....	80
Figure 4.2	Courbe granulométrique du filler calcaire utilisé.....	82

Figure 4.3	Compacteur de plaque LPC	86
Figure 4.4	Étapes liées à la préparation d'une éprouvette pour les essais de retrait empêché ou de module complexe	87
Figure 4.5	Banc de collage	88
Figure 4.6	Vue d'ensemble de la presse MTS et de l'enceinte thermique utilisées pour les essais de retrait thermique empêché	90
Figure 4.7	Schéma en plan de l'enceinte climatique avec le positionnement des extensomètres	91
Figure 4.8	Un extensomètre attaché sur une éprouvette d'enrobé bitumineux	92
Figure 4.9	Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique	94
Figure 4.10	Schéma en plan de l'enceinte thermique avec le positionnement des thermocouples sur l'éprouvette reliés au système d'acquisition de données 5000	99
Figure 4.11	Thermocouple collé sur une éprouvette	100
Figure 4.12	Appareil MTS d'étalonnage des extensomètres	101
Figure 4.13	Anneau de force utilisé pour vérifier la précision de la mesure de la cellule de charge	102
Figure 4.14	L'ajustement du gain (Source : MTS 1998)	103
Figure 4.15	L'ajustement de la dérive (Source : MTS 1998)	104
Figure 4.16	L'ajustement de l'intégration (Source : MTS 1998)	104
Figure 4.17	L'ajustement de l'anticipation (Source : MTS 1998)	105
Figure 5.1	Schéma en plan et en profil du positionnement des thermocouples à la surface de l'éprouvette	107
Figure 5.2	Évolution de la température dans l'enceinte et à la surface d'une éprouvette lors d'un conditionnement à -15°C pour un essai de mesure du module complexe	108
Figure 5.3	Relation entre la température à la surface d'une éprouvette et celle de la consigne lors d'un essai de module complexe (4 heures de conditionnement)	110
Figure 5.4	Évolution de la température dans l'enceinte thermique et à la surface d'une éprouvette durant un essai de retrait empêché	111

Figure 5.5	Étalonnage de l'extensomètre #2325	114
Figure 5.6	Étalonnage de l'extensomètre #2326	114
Figure 5.7	Étalonnage de l'extensomètre #2332	115
Figure 5.8	Dispersion de l'écart de lecture des extensomètres autour de la moyenne	116
Figure 5.9	Comparaison des amplitudes des déformations mesurées par les trois extensomètres et l'amplitude moyenne (Extensomètres : 2325, 2326 et 2332)	117
Figure 5.10	Schéma illustrant la mesure de la déformation d'une éprouvette à l'aide d'extensomètres	118
Figure 5.11	Étalonnage de la cellule de charge réglée à 10 kN avec l'anneau de force	120
Figure 5.12	Étalonnage de la cellule de charge réglée à 100 kN avec l'anneau de force	120
Figure 5.13	Perte de linéarité du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux EG-10A en fonction de l'amplitude de la déformation	122
Figure 5.14	Perte de linéarité du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux EG-10B en fonction de l'amplitude de la déformation	122
Figure 5.15	Évolution de la contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température pour l'enrobé EG-10A	124
Figure 5.16	Évolution de la contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température pour l'enrobé EG-10B	125
Figure 5.17	Points expérimentaux et droite de régression, calculée à l'aide de la méthode des moindres carrés, de la déformation lors d'un essai de mesure du module complexe	127
Figure 5.18	Moyenne des isochrones du module complexe de l'enrobé EG-10A (10% de filler)	128
Figure 5.19	Moyenne des isochrones du module complexe de l'enrobé EG-10B (7% de filler)	129
Figure 5.20	Représentation du module complexe de l'enrobé EG-10A dans le plan Cole-Cole (2 éprouvette #1 et #2)	130
Figure 5.21	Représentation du module complexe de l'enrobé EG-10B	

	dans le plan Cole-Cole (3 éprouvettes #1, #2 et #3).....	131
Figure 5.22	Norme du module complexe en fonction de l'angle de phase dans l'espace de Black pour l'enrobé EG-10A.....	131
Figure 5.23	Méthodologie pour la préparation des éprouvettes avant les essais de retrait thermique empêché ou de mesure du module complexe...	132
Figure 5.24	Méthodologie pour l'essai de retrait thermique empêché (TSRSTS).....	133
Figure 5.25	Organigramme de la méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe.....	134
Figure 6.1	Comparaison des résultats des essais de retrait thermique empêché pour les enrobés EG-10A et EG-10B	139
Figure 6.2	Courbes résultats des essais TSRSTS des enrobés EG-10A et EG-10B et courbes probables des résultats d'essai en traction directe selon la température.....	141
Figure 6.3	Écart relatif entre la norme du module complexe de l'enrobé EG-10A et celle de l'enrobé EG-10B selon la fréquence en fonction de la température.....	145
Figure 6.4	Courbe isothermes et courbes maîtresses à 15°C pour l'enrobé EG-10A (10% de filler)	147
Figure 6.5	Courbe isothermes et courbes maîtresses à 15°C pour l'enrobé EG-10B (7% de filler).....	148
Figure 6.6	Superposition des courbes maîtresse des enrobés EG-10A et EG-10B à 15°C.....	149
Figure 6.7	Facteur de translation utilisé pour la construction des courbes maîtresse des enrobés EG-10A et EG-10B.....	150
Figure 6.8	Représentation schématique du modèle de Huet-Sayegh.....	152
Figure 6.9	Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux de l'enrobé EG-10B et du modèle de Huet-Sayegh tiré des résultats de l'enrobé EG-10B.....	155
Figure 6.10	Représentation dans le domaine de Black des résultats expérimentaux de l'enrobé EG-10B et du modèle de Huet-Sayegh tiré des résultats de l'enrobé EG-10B.....	156

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Synthèse des paramètres pour les divers essais de mesure de la rigidité des enrobés39
Tableau II	Paramètres de l'essai de retrait thermique empêché : essai TSRSTS (Source AASHTO TP10-93)52
Tableau III	Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées (Source : Langlois et coll 2001).....70
Tableau IV	Caractéristiques requises du filler pour enrobés à chaud (Source : ASTM D242-95).....71
Tableau V	Facteurs d'essais ayant une influence sur les résultats des essais de module complexe et de TSRSTS73
Tableau VI	Caractéristiques des granulats utilisés79
Tableau VII	Caractéristiques du filler utilisé81
Tableau VIII	Caractéristiques du bitume utilisé83
Tableau IX	Caractéristiques des deux enrobés EG-10 confectionnés lors de la phase I du programme expérimental83
Tableau X	Fréquences et températures utilisées lors des essais de mesure du module complexe97
Tableau XI	Temps d'acquisition de donnée en fonction de la fréquence d'essai pour les essais de module complexe98
Tableau XII	Étalonnage des trois thermocouples utilisés en vérifiant le zéro107
Tableau XIII	Températures mesurées par chacun des thermocouples collés à la surface de l'éprouvette pour une température de consigne fixe110
Tableau XIV	Évolution du taux de refroidissement en°C/h en cours d'essai TSRSTS évalué à partir de chacun des thermocouples113
Tableau XV	Uniformité de la lecture des extensomètres lors d'un essai cyclique en tension-compression (extensomètre de 100mm).....117
Tableau XVI	Écarts entre les amplitudes des déformations de chacun

	des extensomètres et l'amplitude moyenne lors d'un essai de mesure du module complexe (0°C).....	119
Tableau XVII	Synthèse des résultats de l'essai de la résistance à la fissuration thermique (Ø 60 mm; 10°C/h).....	126
Tableau XVIII	Comparaison du FBE et du FME des enrobés EG-10A et EG-10B...	140
Tableau XIX	Écart entre les valeurs de la norme du module complexe calculées à l'aide de la méthode des moindres carrés et des valeurs de la norme du module complexe calculées à partir de valeurs ponctuelles maximales tirées de l'acquisition des données pour un même essai.....	144
Tableau XX	Valeurs des paramètres E_0, E_{infini}, k, h et δ pour l'enrobé EG-10B et d'autres enrobés tirées de la littérature.....	155

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

$\dot{\epsilon}$	Taux de déformation (1/sec)
$\dot{\sigma}$	Taux de contrainte (MPa/sec)
α	Coefficient de dilatation thermique (mm /mm °C)
ϵ	Déformation (mm/mm)
η	Viscosité du bitume à 135°C (Brookfield)
σ	Contrainte (MPa)
ω	Fréquence (Hz)
φ	Angle de phase (°)
γ	Facteur de forme
μ	Facteur de masse
μ_{def}	Micro déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
$ E^* $	Module de rigidité ou module du module complexe (MPa)
ΔT°	Différence de température (°)
ACTHICK	Épaisseur de l'enrobé (cm)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
B_{ec}	Coefficient de dilatation thermique du liant (mm/mm°C)
B_{agg}	Coefficient de dilatation thermique des granulats (mm/mm°C)
BBR	Bending Beam Rheometer
COEFFX	Coefficient de dilatation thermique (mm/100mm°C)
D	Diamètre (mm)
F_{be}	Film de bitume effectif (μm)
D_b	Densité du bitume
D_{gb}	Densité brut des granulats
D_{ge}	Densité effective des granulats
D_{mm}	Densité maximale du mélange
E	Module d'élasticité ou module de Young (MPa)

E(T,t)	Module de rigidité de l'enrobé (MPa)
E'	Module complexe d'un enrobé bitumineux
E'	Partie réelle du module complexe (MPa)
E''	Partie imaginaire du module complexe (MPa)
ETS	École de technologie supérieure
H	Hauteur (mm)
KPa	Kilo pascal (10^3 Pa)
M_g	Masse de granulat
mm	Millimètre
MINTEMP	Température minimale enregistrée sur site (°C)
MPa	Méga pascal (10^6 Pa)
MTQ	Ministère des transports du Québec
PAV	Pressure Aging Vessel
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé
P_{bi}	Pourcentage de bitume initial
PCG	Presse à cisaillement giratoire
P_e	Pourcentage d'absorption en eau
PEN	Indice de pénétration du bitume à 25°C
P_g	Pourcentage de granulat
µm	Micromètre
P_{mm}	Pourcentage maximal du mélange
PVN	Penetration viscosity number (susceptibilité thermique du bitume)
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
S_b	Rigidité du bitume (MPa)
TANCRACK	Espacement des fissures transversales (m)
T_f	Température finale de l'enrobé (°C)
T_{fraas}	Température de Fraas (°C)
T_g	Température de transition vitreuse (°C)
T_o	Température initiale de l'enrobé (°C)
T_{surface}	Température à la surface de l'enrobé (°C)

t_{trans}	Temps ou facteur de translation
T_z	Température à une profondeur z (°C)
V_{ac}	Quantité de liant dans l'enrobé (% volumique)
V_{agg}	Quantité de granulat dans l'enrobé (% volumique)
V_{air}	Quantité d'air dans l'enrobé (% volumique)
VAM	Pourcentage de vide inter granulaire
V_{ba}	Volume de bitume absorbé (% volumique)
V_{be}	Volume de bitume effectif (% volumique)
V_{bi}	Volume de bitume initial (% volumique)
V_{gb}	Volume des granulats brut (% volumique)
V_{ge}	Volume des granulats effectif (% volumique)
V_i	Pourcentage de vide interstitiels
V_{mb}	Volume brut (total) du mélange
V_{mm}	Volume du mélange maximal (0% vide)

INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux utilisés sur les routes du Québec ont un comportement viscoélastique fortement influencé par la température. C'est pour cette raison que l'enrobé devient rigide et fissure en hiver et qu'il peut y avoir formation d'ornières en été lorsque l'enrobé ramollit.

Les enrobés bitumineux sont constitués à environ 95% de granulats et 5% de bitume. Les granulats qui ont un comportement élastique sont le squelette de l'enrobé tandis que le bitume qui a un comportement viscoélastique assure la cohésion de l'enrobé.

Présentement au Québec, il y a seulement deux essais de caractérisation des enrobés bitumineux. Il y a l'aptitude au compactage mesuré à la presse à cisaillement giratoire (PCG) et la résistance à l'orniérage mesurée à l'aide de l'orniéreur LPC. Pour la caractérisation des performances à basse température des enrobés bitumineux, il existe un test de retrait thermique empêché, mais cet essai ne fait pas encore partie des exigences du ministère des transports du Québec (MTQ).

Le but premier de ce programme expérimental est de mettre au point un essai de caractérisation de la rhéologie des enrobés bitumineux représentatif du comportement dans la chaussée. L'étude de la rhéologie par la mesure du module complexe semble être une solution intéressante. Il est important de préciser que nous tentons de caractériser seulement la partie linéaire du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. Le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux demeure dans le domaine linéaire lors des essais lorsque la déformation imposée reste petite. Caractériser la résistance à basse température des enrobés bitumineux par l'essai de retrait thermique empêché est également un objectif de ce programme expérimental.

Ce travail est divisé en deux parties principales. Il y a d'abord une revue de la documentation qui permet de faire une synthèse des connaissances actuelles sur la

rhéologie des enrobés bitumineux et sur leur performance à basse température. La deuxième partie consiste en un programme expérimental.

L'expérimentation est également séparée en deux parties. La première porte sur les aspects métrologiques et sur l'ajustement des paramètres des essais de mesure du module complexe et de retrait thermique empêché. Les aspects métrologiques permettent de fixer les limites d'utilisation des appareils et ainsi limiter les erreurs qui pourraient être reliées à la mesure. Deux enrobés bitumineux différents sont testés en retrait thermique empêché puis en module complexe dans le cadre du programme expérimental (deuxième partie).

CHAPITRE 1

REVUE DE LA DOCUMENTATION

Ce premier chapitre présente une brève revue de la documentation en passant par les points qui sont essentiels à la bonne compréhension de la rhéologie et de la fissuration thermique des enrobés bitumineux. Sans ces connaissances, l'expérimentation est toujours possible, mais l'analyse des résultats est plus complexe.

La première partie de ce chapitre est consacrée à définir ce qu'est un enrobé bitumineux et précise sommairement le rôle de chacune de ses composantes. La deuxième partie de ce chapitre traite de la rhéologie des enrobés bitumineux; les essais en laboratoire et les facteurs déterminants y seront abordés. Finalement, il est question de la performance des chaussées à basse température. L'essai de retrait thermique empêché, comme indicateur de la performance de la chaussée à basse température, et les facteurs déterminants y seront abordés.

1.1 L'enrobé

Un enrobé bitumineux est un mélange de granulats et de bitume. Selon Langlois et coll (2001), un enrobé est un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume. Les granulats comptent pour environ 95% du mélange et le bitume pour 5%.

Les granulats sont des matériaux dont le comportement est élastique tandis que le bitume a un comportement variable en fonction du temps. Chacune des deux composantes de l'enrobé a sa propre fonction. Le mélange de ces deux phases donne un matériau viscoélastique ayant un comportement linéaire à faibles déformations et un comportement non-linéaire à fortes déformations (Doucet et coll 2000).

Langlois et coll (2001) définissent trois types d'enrobés bitumineux, soient :

Les graves-bitumes; matériaux utilisés en couche de base dans les chaussées. Ce sont des enrobés de grosseurs nominales maximales de 20 mm ou 28 mm avec une faible teneur en bitume (3% à 4,5%) posés sur des épaisseurs de 60 mm à 150 mm. Utilisé pour sa capacité structurale.

Les enrobés de liaison; enrobés d'une grosseur nominale maximale pouvant aller jusqu'à 14 mm qui sont posés entre deux couches d'enrobés. Ces enrobés qui ont une teneur en bitume de 4% à 5,2% sont posés en couches d'environ 60 mm d'épaisseur. Utilisé pour comme couche de correction.

Les enrobés de surface; enrobés servant de couche de roulement. Dans cette catégorie d'enrobés, il y a les chapes d'étanchéité, les enrobés grenus, les enrobés semi-grenus, les enrobés denses et les enrobés drainants. Le choix du type d'enrobé de surface se fait en fonction de l'épaisseur de pose, des matériaux utilisés et du trafic auquel il devra résister. La grosseur maximale des granulats de ces enrobés varie de 5 mm à 14 mm. Couche servant au confort de l'utilisateur.

1.1.1 Le liant

Le liant, le bitume, sert à lier ensemble les diverses composantes de l'enrobé. Par ses propriétés viscoélastiques, il contribue au comportement mécanique de la chaussée en plus de la rendre étanche (Shell Bitumes 1991). Le bitume joue un rôle déterminant autant dans le comportement rhéologique à haute température qu'à basse température dans les enrobés bitumineux. À la température de la pièce, le bitume est plutôt cohésif; il faut le chauffer afin de réduire cette cohésion de manière à pouvoir bien enrober les granulats, d'où l'appellation « enrobé à chaud ».

Les bitumes sont classés selon un grade de performance en fonction de la température (MTQ 2001). Un PG 58-28 par exemple, est un bitume dont la plage de bon rendement se situe entre 58°C et -28°C. À haute température, le bitume doit avoir une cohésion minimale sinon il y aura de l'orniérage et du désenrobage et, à basse température, le bitume doit garder une certaine élasticité sinon il se fissurera (Langlois

et coll 2001). Les bitumes sont soit standards soit modifiés aux polymères afin d'agrandir leur plage de bon rendement. Au Canada, la classification des bitumes a longtemps été établie sur la base de l'indice de pénétration. Cette base est encore couramment utilisée en Europe. Cependant, depuis 1997, le Québec a adopté le système de classification Superpave (PG H-L).

Le bitume est principalement composé de deux phases. Une phase soluble dans l'heptane, les maltènes et une phase insoluble constitué des asphaltènes (Bonniot 1993). Ce sont les asphaltènes qui sont principalement responsables du comportement rhéologique du bitume.

La notion de température de transition vitreuse (T_g) est importante pour le bitume. En dessous du T_g , l'enrobé a un comportement élastique, c'est à dire qu'il n'y a plus de relaxation (Aklonis et MacKnight 1983). Autrement dit, le bitume passe de déformable à fragile (Young et coll 1998). Il devrait plutôt être question de zone de transition plutôt que d'une température de transition, car pour la plupart des matériaux, ce changement de comportement mécanique n'est pas instantané (Bahia et Anderson 1993). La zone de transition vitreuse du bitume est représentée par un changement dans son coefficient de dilatation thermique, un changement de son module d'élasticité et un changement de sa masse volumique (Young et coll 1998 et Bahia et Anderson 1993). Ces changements sont dus à la baisse de mobilité des atomes à cause d'une diminution de l'espace libre disponible (Bahia et Anderson 1993). Ce n'est pas une restructuration des chaînes de molécules, elles sont simplement « gelées » en place (Callister 2000). La température de transition vitreuse va augmenter s'il y a plus de liens ou des liens plus forts dans les molécules ou entre elles. Plus les chaînes sont rigides, plus la T_g sera élevée (Callister 2000).

1.1.2 La masse granulaire

Étant donné que l'enrobé est majoritairement composé de granulats, le choix de ces derniers est très important. Le terme granulat peut être défini comme étant: « un ensemble de particules de matières solides, provenant de roches meubles ou

consolidées ou de matériaux recyclés; ces particules sont de dimension, de forme et de nature diverses » (Aïtcin et coll 1992) .

Un point important à prendre en considération dans la masse granulaire est le squelette granulaire. Le squelette granulaire distribue les charges imposées à l'enrobé. Ce sont aussi bien les petites que les grosses particules qui participent à cette distribution des charges (Tremblay 2001). La granulométrie de l'enrobé peut être continue ou discontinue, ouverte ou dense.

La masse granulaire comprend également le filler. Le MTQ se réfère à la norme ASTM D242-95 *Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixtures* pour la définition d'un filler. Selon cette norme, un filler est une matière minérale finement divisée comme des cendres volantes ou de la poussière de pierre avec 100% passant le tamis 600 μm , entre 95 et 100% passant le tamis 300 μm et de 70 à 100% passant le tamis 80 μm . Dans l'enrobé, une petite partie du filler fait partie du squelette de l'enrobé et aide à la capacité portante tandis que la majeure partie de ce dernier reste en suspension dans le bitume (Harris et Stuart 1995). Par contre, l'apport à la capacité portante du filler est vraiment faible car il y a peu de contact grain à grain (Cupo-Pagano et coll 1997). Le filler a comme fonction de réduire les vides interstitiels et d'améliorer la cohésion du mortier bitumineux (Tremblay 2001). Le filler accroît également la compactibilité de l'enrobé, il permet d'utiliser plus de liant tout en évitant le ressuage, il augmente la viscosité du liant et ralentit le vieillissement du bitume (Di Benedetto, 1998a). La granulométrie du filler ne semble pas avoir d'influence sur la viscosité (Anderson et coll 1992) même si certains auteurs recommandent une limite au tamis 20 μm (Haddock 1998). Par contre, selon AASHTO (2001), plus le filler est fin, plus son effet sur la viscosité sera grand.

1.1.3 Le mortier bitumineux, le mastic

Le mortier bitumineux est constitué du bitume avec les fines passant le 75 μm (Brown et coll 1996). Peu d'auteurs font allusion à l'importance du mortier sur la rhéologie des enrobés. Par contre, selon Anderson et coll (1992), le mortier joue un rôle majeur sur

le comportement des enrobés. Selon Harris et Stuart (1995), c'est le mortier plus que le liant qui maintient ensemble les grosses particules dans l'enrobé. Huber et Scherocman (1999) ajoutent que la dureté de mortier influence beaucoup le comportement de l'enrobé. Plus un mortier est rigide, moins il permettra le mouvement des grosses particules, ce qui a une incidence directe sur la rhéologie de l'enrobé.

1.2 Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

Dans cette section, il est question de la classification des enrobés bitumineux en fonction de leurs propriétés mécaniques. Il est également question du comportement rhéologique des enrobés.

1.2.1 Classification des enrobés bitumineux

Les essais conduits sur les enrobés bitumineux peuvent être classifiés selon l'état de contrainte au sein de l'éprouvette en cours d'essai. Il y a les essais homogènes et les essais non-homogènes (Di Benedetto et de la Roche 1998).

Dans des conditions homogènes, l'état des contraintes au sein de l'éprouvette est uniforme en tout point. Les essais homogènes ont également l'avantage de donner accès directement à la contrainte et à la déformation et donc aux propriétés rhéologiques. Par contre, avec les essais non-homogènes, les propriétés rhéologiques sont obtenues grâce à l'utilisation de lois de similitude.

Les essais peuvent également être classés selon leur interprétation (Doubbaneh 1995). De cette manière, les essais peuvent être classés comme essais empiriques, essais de simulation ou essais de détermination.

Essais empiriques - Dans le cas des essais empiriques, le mode de sollicitation est différent de celui existant dans l'ouvrage. Ces essais ne permettent pas de déterminer les propriétés intrinsèques du matériau. De plus, seule l'expérience du praticien permet de faire le lien entre ces essais et les propriétés d'usage de ces matériaux, car

il n'existe pas de relation théorique entre les deux.

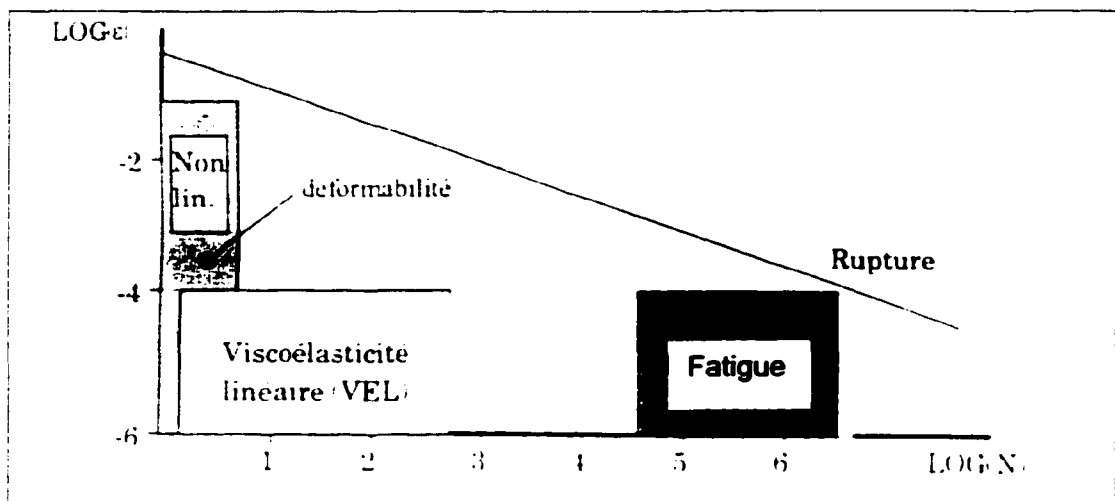
Essais de simulation - Les essais de simulation sont des essais plus représentatifs que les essais empiriques. Dans ce type d'essai, les sollicitations sont le plus près possible de celles existantes dans l'ouvrage étudié, mais à plus petite échelle. Ces essais sont également empiriques car les sollicitations appliquées restent complexes.

Essais de détermination - Les essais de détermination permettent de passer, par une méthode théorique, des résultats en laboratoire aux propriétés d'usage du matériau étudié. Ces essais utilisent des sollicitations simples et bien définies qui permettent de calculer les propriétés intrinsèques du matériau.

1.2.2 Le comportement mécanique des enrobés bitumineux

Lorsque des essais homogènes sont utilisés, le comportement mécanique d'un enrobé bitumineux peut être classé selon le niveau de contrainte en déformation et le nombre de cycle de sollicitation (Di Benedetto et de la Roche 1998).

Il y a d'abord le comportement fortement non-linéaire qui apparaît avec un nombre très restreint de cycles de grande déformation (quelques pour cent). Ensuite, il y a le comportement viscoélastique linéaire observé dans le cas de petites déformations. En effet, pour rester dans le domaine linéaire du comportement viscoélastique de l'enrobé, la déformation doit rester sous les 100 micro déformations (Di Benedetto et de la Roche 1998). Néanmoins, le nombre de cycles joue un rôle déterminant. Il doit être limité à quelques centaines de cycles afin de demeurer dans le domaine viscoélastique linéaire. C'est dans cette classe de comportement que nous allons travailler dans le cadre de notre programme expérimental de manière à pouvoir établir les propriétés rhéologiques à partir des lois de la viscoélasticité linéaire. Dans le cas où un nombre élevé de cycles est imposé, plusieurs dizaines de milliers, le comportement mécanique de l'enrobé présente un phénomène de fatigue et ce même sous l'action de petites déformations (figure 1.1).



**Figure 1.1: Comportement mécanique "type" des enrobés bitumineux, (ϵ) déformation et (N) nombre de chargements
(Source : Di Benedetto et De La Roche, 1998)**

1.2.3 La rhéologie

Toute substance peut exister sous trois états physiques : solide, liquide ou gazeux. C'est la balance entre l'énergie de cohésion, rapprochant les atomes, et l'énergie thermique qui cherche plutôt à les séparer, qui détermine son état physique (Kurz et coll 1989). D'autre part, c'est majoritairement le type de liaison interatomique qui régit la cohésion au sein du matériau. En science des matériaux, le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau. Plusieurs matériaux utilisés en construction (acier, aluminium, bois, etc.) présentent une cohésion quasi-stable dans le domaine des conditions d'utilisation; le module d'élasticité permet une bonne appréciation de leur comportement mécanique. Pour un enrobé bitumineux, la structuration du liant hydrocarboné fait en sorte que son degré de cohésion varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement. Pour connaître l'évolution de cette cohésion, l'étude de la relation entre la contrainte et la déformation dans divers scénarios de températures et de fréquences de charge est nécessaire et ce, dans des conditions contrôlées : c'est l'étude de sa rhéologie.

En fait, la rhéologie est la science qui fait l'étude des lois de comportement des matériaux (viscosité, plasticité, élasticité) liant les contraintes et les déformations à un instant donné (Roy et Blin-Lacroix 1998).

Il est possible de classer un matériau par son comportement mécanique dans le temps (Côté 1983). Il y a les matériaux élastiques, les matériaux visqueux, les matériaux plastiques et les matériaux qui ont un comportement entre deux (élastoplastique, viscoélastique, etc.). Il convient dans le cadre de cette revue de la littérature, de rappeler brièvement les différents types de comportement mécanique de ces classes de matériaux

1.2.3.1 Le comportement élastique

Tel que décrit par Timosanko (1936) :

Tous les matériaux de construction possèdent, à un certain degré, la propriété d'être élastiques. C'est-à-dire que si les forces extérieures qui provoquent la déformation d'un corps, ne dépassent pas une certaine limite, la déformation disparaît en même temps que la force qui lui a donné naissance.

Un comportement est dit élastique s'il existe une relation bi-univoque entre le paramètre de charge P et le paramètre de déformation p et que la déformation est réversible (Darve 1987). Une relation bi-univoque implique qu'un chemin de réponse donné a un chemin de sollicitation unique. Le comportement d'un matériau élastique ne dépend pas de l'histoire du chargement.

Un matériau présente une élasticité parfaite lorsque la courbe de décharge coïncide avec la courbe de charge. D'autre part, si des courbes sont des droites, le matériau présente une élasticité linéaire. Par contre, même les matériaux parfaitement élastiques peuvent avoir un comportement non-linéaire (Côté 1983).

1.2.3.2 Le comportement visqueux

Les matériaux purement élastiques sont peu nombreux. Par contre, tous les matériaux, même les matériaux fragiles comme le verre, présentent un comportement élastique. Par opposition, plusieurs matériaux présentent un comportement différé sous charge. Même le béton de ciment a une composante visqueuse. La déformation sous charge des matériaux visqueux est grandement influencée par les conditions de chargement (temps et fréquence) et ce, même à la température de la pièce (Young et coll 1998). Il est donc usuel de décrire le comportement mécanique des matériaux doués de viscosité par la juxtaposition d'une composante élastique, indépendante du temps, à une composante différée, dépendante du temps.

Le comportement visqueux se manifeste dans trois grandes classes de phénomènes (Darve 1987) :

1. La variation des propriétés mécaniques avec la vitesse de sollicitation;
2. la relaxation;
3. le fluage.

La variation des propriétés mécaniques – L'indicateur de propriétés mécaniques qui est souvent pris en compte lors des essais est le module de rigidité. Pour un matériau doué d'un comportement visqueux, le module de rigidité est grandement influencé par la fréquence à laquelle les essais de caractérisation sont effectués (figure 1.2). À titre d'exemple, pour un enrobé bitumineux à 30°C, une augmentation de la fréquence de sollicitation de 1 Hz à 30 Hz peut faire quintupler la valeur de ce module (figure 1.2).

La relaxation – Le phénomène de relaxation représente une variation de la contrainte dans le temps au sein d'une éprouvette soumise à un état de déformation maintenue constante (Aklonis et MacKnight 1983). La fonction de relaxation est généralement désignée par $r(t)$.

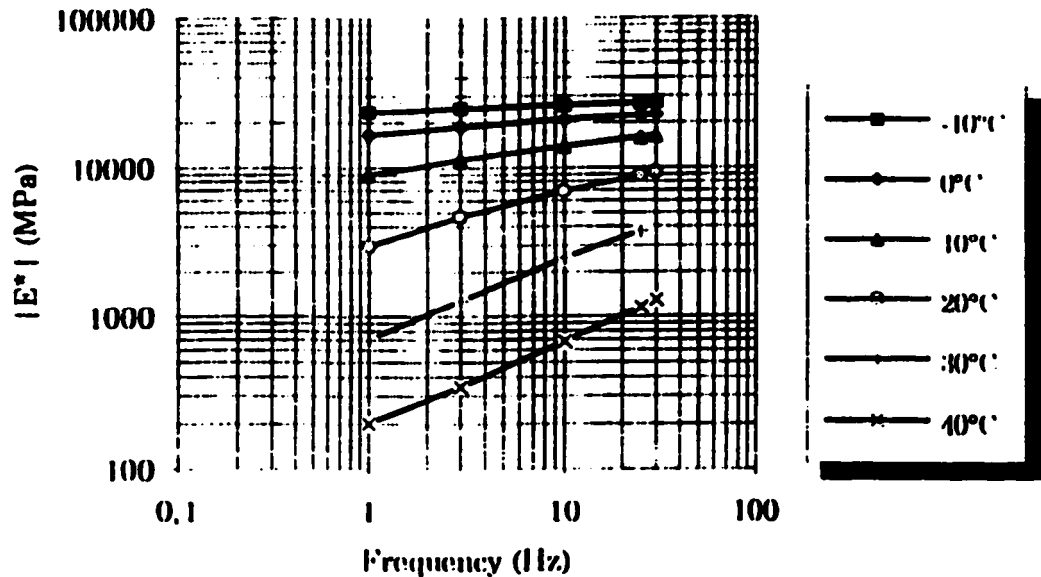


Figure 1.2 : Variation de la norme du module complexe en fonction de la fréquence de chargement et de la température
(Source : Di Benedetto et De la Roche 1998)

Le fluage – Le phénomène de fluage est la variation de la déformation dans le temps au sein d'une éprouvette soumise à un état de contrainte maintenue constante (Aklonis et MacKnight 1983). La fonction de fluage, ou fonction de retard, est généralement désignée par $f(t)$.

Tant pour le phénomène de fluage que pour celui de la relaxation, la réponse d'un matériau doté d'un comportement visqueux évolue dans le temps. Il est question d'un comportement différé des matériaux présentant un comportement rhéologique visqueux. Tout comme pour le comportement élastique, le comportement visqueux des matériaux peut être linéaire et non linéaire.

Les bitumes et les enrobés bitumineux sont des matériaux qui présentent un comportement visqueux. Lorsque le bitume est soumis à une contrainte, il y a une

déformation instantanée et une déformation différée. Une fois la contrainte enlevée, le matériau revient à sa forme initiale mais de façon graduelle (Young et coll 1998). Sa déformation instantanée est reliée à sa composante élastique, tandis que sa déformation différée est reliée à sa composante visqueuse. Le bitume reprendra sa forme initiale seulement s'il n'a pas été déformé au-delà de sa limite d'élasticité. La limite d'élasticité étant la limite des forces pouvant agir sur un solide sans entraîner de variation permanente de sa forme et de ses dimensions (Kurz et coll 1989).

1.2.3.2.1 Viscoélasticité uniaxiale

Quelle que soit la charge appliquée (non nulle et inférieure à celle de la rupture) et l'histoire de charge précédant l'application d'une charge constante, certains matériaux (polymères, bétons, enrobés, etc.) présentent, sous une sollicitation uniaxiale, une évolution de leur déformation au cours du temps: ce sont des matériaux viscoélastiques (Salençon, 1983). La figure 1.3 montre le comportement des matériaux viscoélastiques selon deux cas de figure : 1) sous l'action d'une contrainte imposée (a et b; Phénomène de recouvrance) et 2) sous l'action d'une déformation imposée (c et d; Phénomène d'effacement).

Pour départager les comportements viscoplastique et viscoélastique, Mandel a proposé de décider du caractère viscoélastique d'un comportement en se référant à l'expérience d'effacement pour un corps non-vieillissant, c'est-à-dire un corps dont les propriétés mécaniques n'évoluent pas avec le temps ou encore, que l'âge du matériau n'intervient pas. L'expérience d'effacement consiste à imposer une déformation, ϵ_0 (figure 1.3c), et d'observer l'évolution de la contrainte au sein du matériau ; une contrainte instantanée, σ_0 (figure 1.3d), liée à l'élasticité du matériau, se présente et cette contrainte décroît dans le temps par relaxation. Lorsque la déformation est ramenée à zéro (à $t = t_1$), un effacement des contraintes est produit et s'il est total ($\sigma_\infty = 0$), le matériau est dit viscoélastique (Neifar 1997).

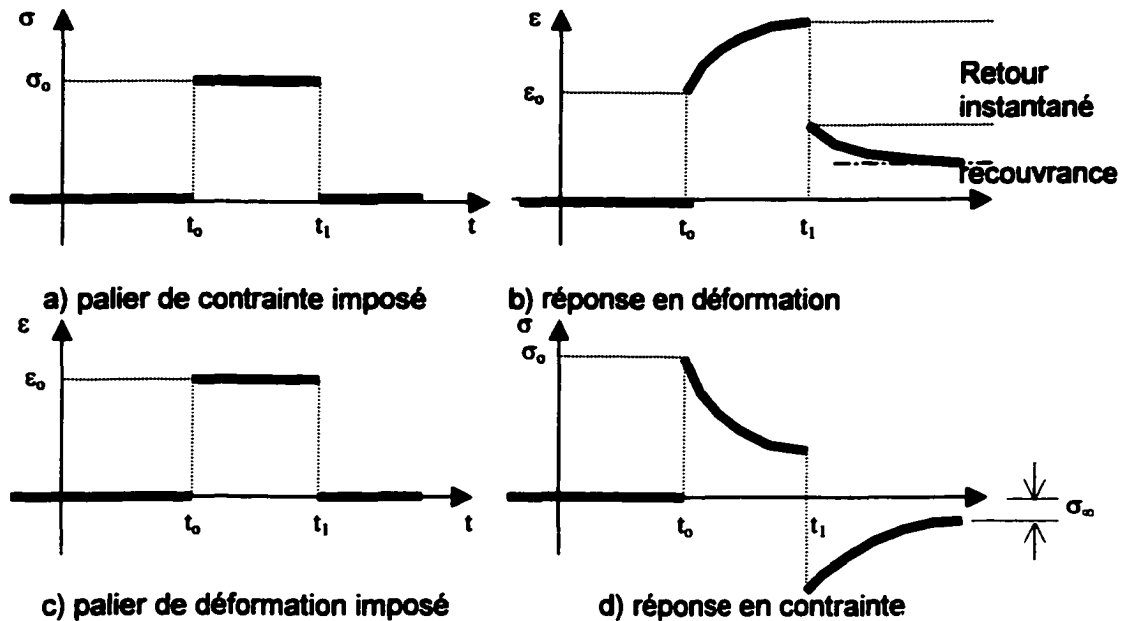


Figure 1.3 :Expériences de recouvrance (a et b) et d'effacement (c et d)
(Source : Salençon, 1983)

1.2.3.2.2 Viscoélasticité linéaire (VEL)

Un matériau présente un comportement viscoélastique linéaire si sa réponse globale à une sollicitation décomposable en sollicitations élémentaires est égale à la somme des réponses élémentaires aux sollicitations élémentaires (Neifar 1997). C'est le principe de Boltzmann.

Sous l'action d'une sollicitation $\sigma(t)$, la réponse $\varepsilon(t)$ en VEL, s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) f(0) + \int_0^t f'(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (\text{Éq. 1.1})$$

Également, sous l'action d'une sollicitation $\varepsilon(t)$, la réponse $\sigma(t)$ s'écrit:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) r(0) + \int_0^t r'(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{Éq. 1.2})$$

Les équations 1.1 et 1.2 décrivent le comportement mécanique du matériau en VEL. Les fonctions $f(t)$ et $r(t)$ sont respectivement les fonctions de fluage et de relaxation. Pour un matériau élastique linéaire, l'équation 1.2 se résume à la loi de Hooke pour laquelle le module de Young correspond à $r(0)$.

Par calcul opérationnel, le calcul des intégrales (Éq. 1.1 et 1.2) se transpose dans un espace de calcul, le domaine des transformées, dans lequel il se résume en une équation algébrique ordinaire. Le calcul opérationnel permet de passer d'un problème en VEL à un problème EL (élasticité linéaire). Après avoir trouvé la solution dans le domaine des transformées, elle est transposée à nouveau, toujours par calcul opérationnel, mais cette fois pour revenir dans le domaine temporel.

L'application du calcul opérationnel est particulièrement intéressant lorsque la sollicitation imposée est sinusoïdale puisque la fonction de relaxation, dans le domaine des transformées, prend la forme de celle d'un vecteur dans l'espace des nombres complexes, le module complexe. On a alors:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi(\omega)} = |E^*| e^{i\varphi(\omega)} \quad (\text{Éq. 1.3})$$

Où :

- $E^*(\omega)$: le module complexe ;
- σ_0 et ε_0 : l'amplitude de la contrainte et l'amplitude de la déformation ;
- $|E^*|$: la norme du module complexe (MPa) ;
- i : la partie imaginaire d'un nombre complexe ($i^2 = -1$) ;
- φ : l'angle de phase ($^\circ$).

On peut donc décrire le comportement VEL d'un matériau en traçant l'évolution de son module complexe (Di Benedetto, 1998a). La détermination du module complexe permet en quelque sorte de s'affranchir de l'effet temporel sur les propriétés rhéologiques du matériau. : le module complexe n'est pas fonction du temps, mais bien de la fréquence à une température donnée (Di Benedetto et de La Roche, 1998). Nous traiterons plus en détail du module complexe à la section 1.2.4.

Domaine de linéarité - Afin de cibler le domaine de linéarité du comportement viscoélastique d'un enrobé, des essais à diverses déformations doivent être faits suivant des plages de températures et de fréquences. Les résultats sont ensuite exprimés en valeurs relatives puis rapportés dans un graphique de manière à visualiser la perte de linéarité en fonction du niveau de la déformation imposée. La figure 1.4 présente un exemple appliqué à un enrobé bitumineux.

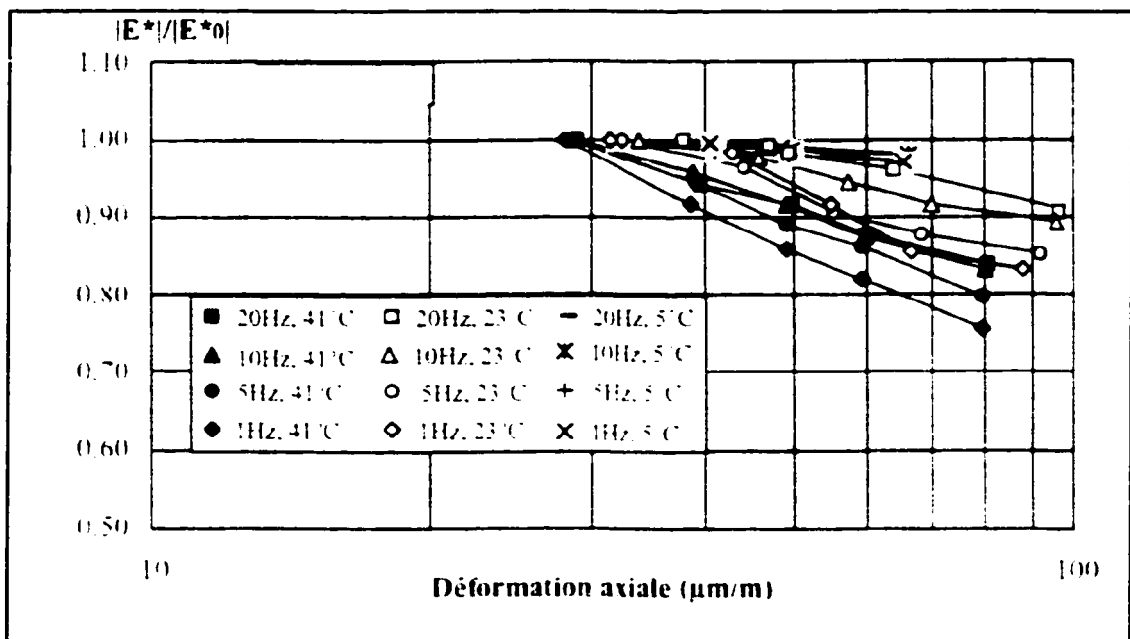


Figure 1.4 : Perte de linéarité en fonction de la déformation imposée (Source : Di Benedetto et de la Roche 1998)

1.2.3.3 Les modèles rhéologiques simples

Le comportement des matériaux peut être décrit par des modèles rhéologiques simples. Plusieurs éléments sont utilisés pour élaborer des modèles rhéologiques afin de décrire les différents comportements rhéologiques des matériaux. Il est possible de distinguer deux familles d'éléments (figure 1.5); soit les éléments non visqueux, notés EP (élastoplastique) et les éléments purement visqueux, notés V. (Neifar 1997).

Tous ces différents éléments (figure 1.5) ont pour but de caractériser les non-linéarités et les irréversibilités physiques observées dans le comportement rhéologique des matériaux.

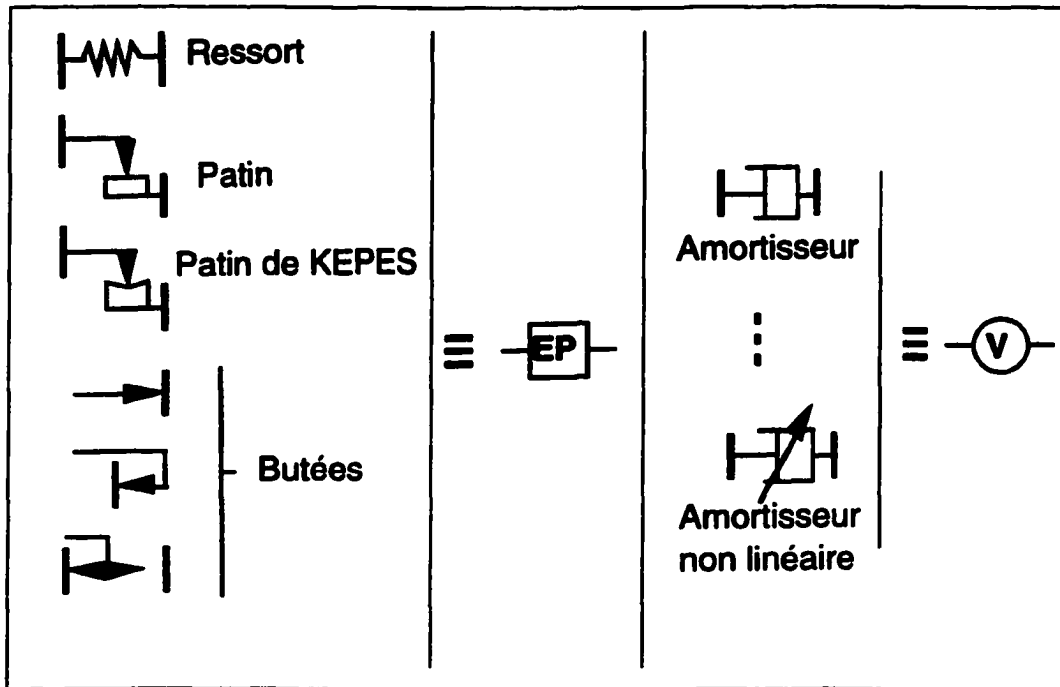


Figure 1.5 : Exemple d'éléments purement visqueux « V » et d'éléments non visqueux « EP » (Source : Neifar 1997)

Le modèle de Maxwell et le modèle de Kelvin-Voigt sont des modèles permettant de décrire le comportement des matériaux viscoélastiques (Young et coll 1998 et Bonniot 1993). Ces modèles rhéologiques, présentés à la figure 1.6, combinent l'effet de deux éléments simples pour décrire le comportement mécanique d'un matériau : le ressort et l'amortisseur. Dans le modèle de Kelvin-Voigt, la déformation totale est la même que la déformation du ressort et de l'amortisseur, contrairement au modèle de Maxwell dans lequel la déformation totale est la somme des déformations des deux éléments. Le modèle de Maxwell représente le comportement rhéologique d'un matériau de type viscoélastique par un ressort et un amortisseur attachés en série (Young et coll 1998).

Sur la figure 1.6, $f(t)$ représente les fonctions de fluage, $r(t)$ les fonctions de relaxation et E^* le module complexe. Si la relaxation n'est pas possible avec le modèle de Kelvin-Voigt, c'est parce que le ressort empêche l'amortisseur de se détendre.

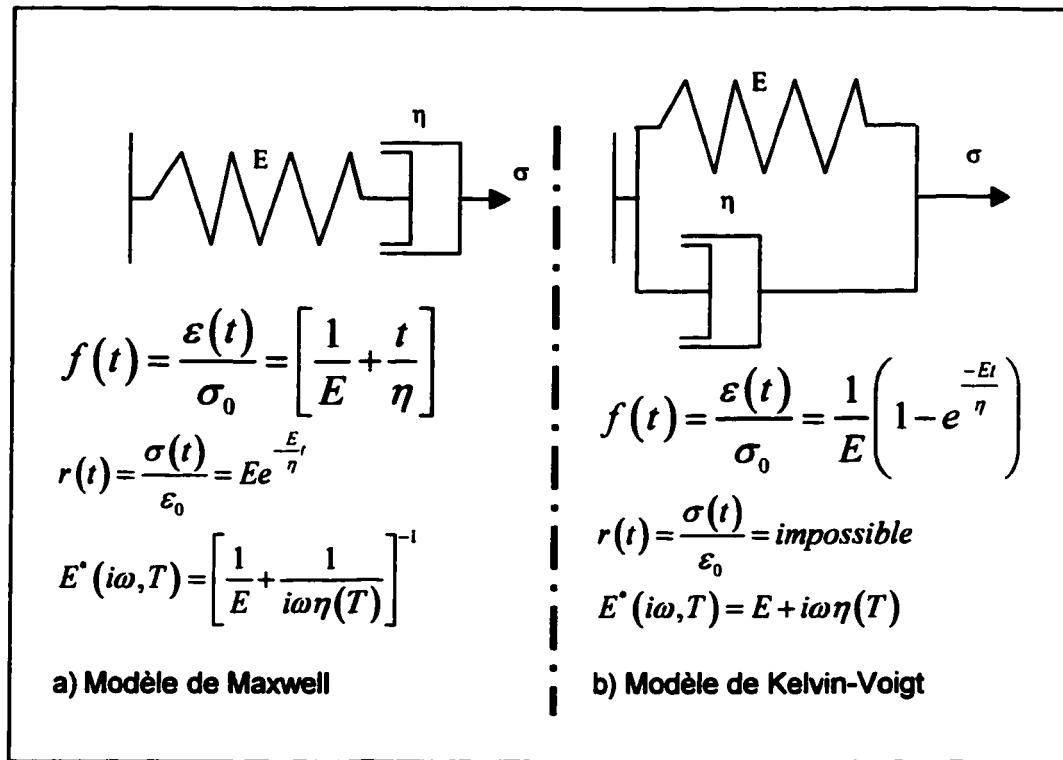


Figure 1.6 : Modèles de Maxwell (a) et de Kelvin-Voigt (b) utilisés pour décrire les comportements viscoélastiques (Source : Salençon 1983)

1.2.4 Le module complexe des enrobés bitumineux

Comme souligné à la section 1.2.3.2.2, l'étude des propriétés rhéologiques d'un matériau ayant un comportement VEL peut se faire par la mesure de son module complexe. Lorsqu'un matériau présente un comportement VEL, la réponse à une sollicitation sinusoïdale est également sinusoïdale mais avec un déphasage. La figure 1.7 montre l'évolution des efforts et des déplacements pour un matériau VEL soumis à une sollicitation sinusoïdale.

Le module complexe est donc un coefficient de proportionnalité entre l'amplitude sinusoïdale complexe de la contrainte, à une fréquence « ω » donnée, et l'amplitude sinusoïdale complexe de la déformation (Di Benedetto et de la Roche 1998). La contrainte est toujours en avance sur la déformation (Soltani 1998).

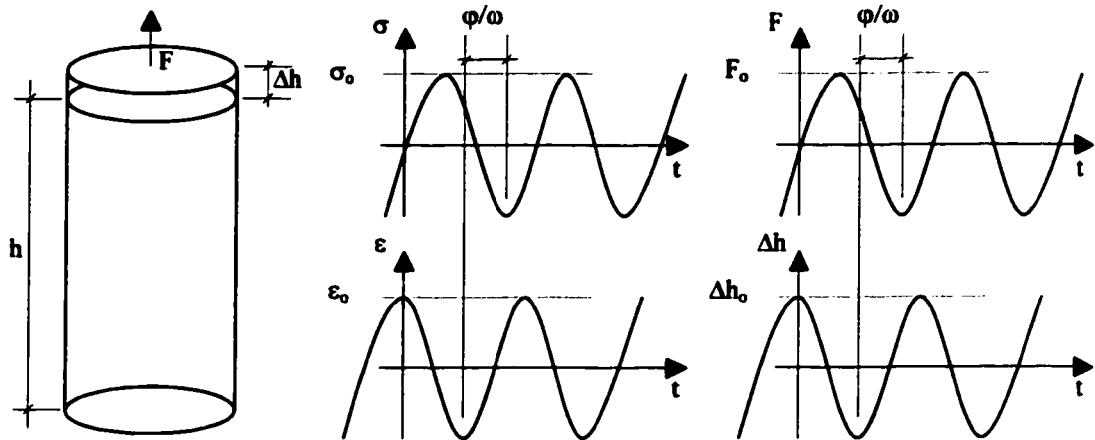


Figure 1.7 : Définition du module complexe : évolution des efforts (contraintes) et déplacements (déformations) pour un matériau viscoélastique linéaire (Diagramme pas à l'échelle) (Source : Di Benedetto, 1998b)

L'angle de phase donne une idée de la prédominance élastique ou visqueuse de l'enrobé. Un angle de phase de 90° implique un matériau purement visqueux tandis qu'un angle de phase de 0° correspond à un matériau purement élastique (Hunter 2000).

Le module complexe peut également s'écrire sous forme vectorielle en le décomposant en deux parties, soit la partie réelle et la partie imaginaire (Aklonis et MacKnight 1983 et Di Benedetto 1998a) :

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (\text{Éq. 1.4})$$

Puisque mathématiquement, les identités d'Euler nous permettent d'écrire :

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (\text{Éq. 1.5})$$

Par conséquent, l'équation 1.3 peut s'écrire:

$$|E^*| e^{i\varphi} = |E^*| \cos \varphi + i |E^*| \sin \varphi \quad (\text{Éq. 1.6})$$

Les composantes E_1 et E_2 sont alors:

$$E_1 = |E^*| \cos \varphi \quad \text{et} \quad E_2 = |E^*| \sin \varphi \quad (\text{Éq. 1.7})$$

$$\text{Également } |E^*| = (E_1^2 + E_2^2)^{1/2}$$

La composante E_2 représente le module irréversible, le module dissipé, le « loss modulus » qui est associé à la partie visqueuse du matériau. Le E_1 représente la partie réelle ou le module réversible qui est associé à la partie élastique (figure 1.8). Il est à noter que le module irréversible est utilisé pour mesurer l'énergie dissipée par une friction interne du matériau (Aklonis et MacKnight 1983). C'est le comportement visqueux qui est à l'origine de cette dissipation interne d'énergie. Elle se traduit par une augmentation de la température au sein du matériau sous l'effet d'un chargement cyclique.

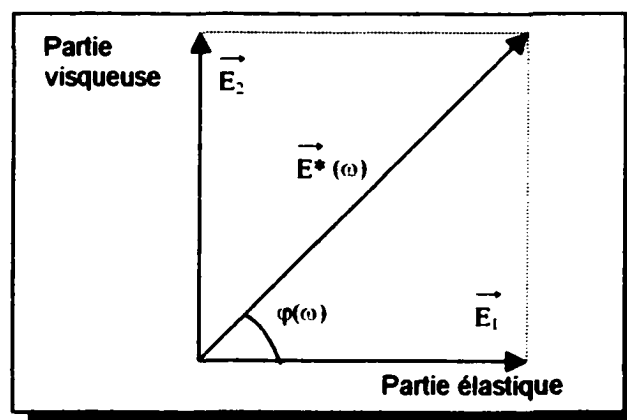


Figure 1.8: Représentation vectorielle de la partie réelle et de la partie imaginaire du module complexe
(Source : Aklonis et MacKnight 1983)

Cette propriété spécifique des matériaux viscoélastiques va jouer un rôle important dans la mesure de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux. En effet, la fatigue est déterminée suivant une répétition de cycles de chargement. Malgré que le niveau de sollicitation soit faible en cours d'essai (inférieur à 10^{-4}), l'effet cyclique induit une augmentation de la température au sein de l'éprouvette et modifie ainsi la rhéologie de l'enrobé en cours d'essais (Soltani 1998 et Neifar 1997). En effet, le module complexe d'un enrobé diminue avec une augmentation de la température; une perte de 8% à 10% par °C (Di Benedetto et coll 1996). L'évolution des propriétés rhéologiques en cours d'essai de fatigue exige d'être prise en compte dans l'analyse des résultats, d'autant plus qu'usuellement, l'endommagement à la fatigue d'un enrobé est évalué à partir de l'évolution de son module complexe.

La norme du module complexe $|E^*|$ est un indicateur de la rigidité du matériau (Doucet et coll 1999). Connaître cette rigidité permet de mieux comprendre la répartition des charges dans les couches sous-jacentes à la couche de roulement étudiée comme illustré à la figure 1.9.

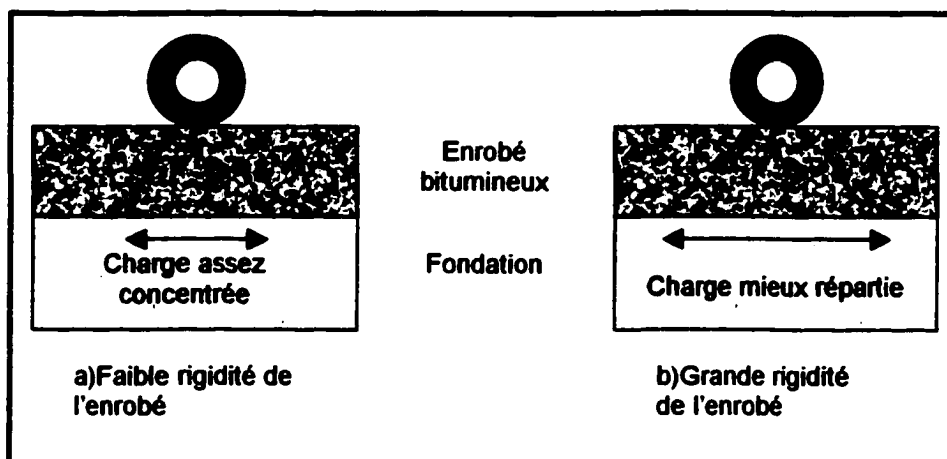


Figure 1.9: Répartition des charges en fonction de la rigidité de l'enrobé
(Adapté de Doucet et coll 2000)

1.2.4.1 Représentation du module complexe dans le plan complexe (plan Cole-Cole)

Le module complexe peut être présenté dans un plan complexe à partir de la partie réelle (E_1) et de la partie imaginaire (E_2) du module complexe (Di Benedetto et de la Roche 1998). Pour certains matériaux viscoélastiques linéaires, les points expérimentaux se situent sur une courbe proche d'un arc de cercle dans le plan complexe, laquelle ne dépend ni de la température ni de la fréquence (Soltani 1998). Dans ce cas, les matériaux répondent au principe d'équivalence temps-température. Cette courbe est unique et elle représente l'ensemble des résultats des essais effectués pour mesurer le module complexe. La figure 1.10 montre un exemple type de l'évolution du module complexe d'un enrobé évaluée en conditions isothermes (-10, 0, 10, 20, 30 et 40°C) à diverses fréquences de sollicitation (1, 3, 10, 15 et 30 Hz).

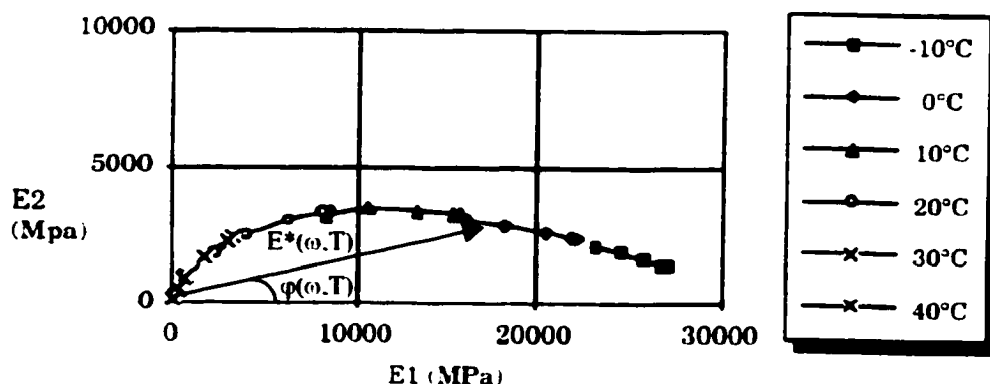


Figure 1.10 : Exemple de courbe d'un essai de module complexe dans un plan Cole-Cole (Adapté de Di Benedetto et de la Roche 1998)

1.2.4.2 Représentation du module complexe dans l'espace de Black

La représentation dans l'espace de Black permet de bien voir l'évolution de l'angle de phase avec la température. La figure 1.11 montre un exemple représentatif de l'évolution de l'angle de phase d'un enrobé bitumineux dans l'espace de Black

évaluée en conditions isothermes (-10, 0, 10, 20, 30 et 40°C) à diverses fréquences de sollicitation (1, 3, 10, 15 et 30 Hz). Notamment, dans le cas d'un enrobé bitumineux, l'angle de phase augmente lorsque la température augmente et que la fréquence diminue. Cette variation de l'angle de phase est liée à la présence de granulats dans l'enrobé; pour les bitumes purs, l'angle de phase augmente jusqu'à une valeur asymptotique (Soltani 1998).

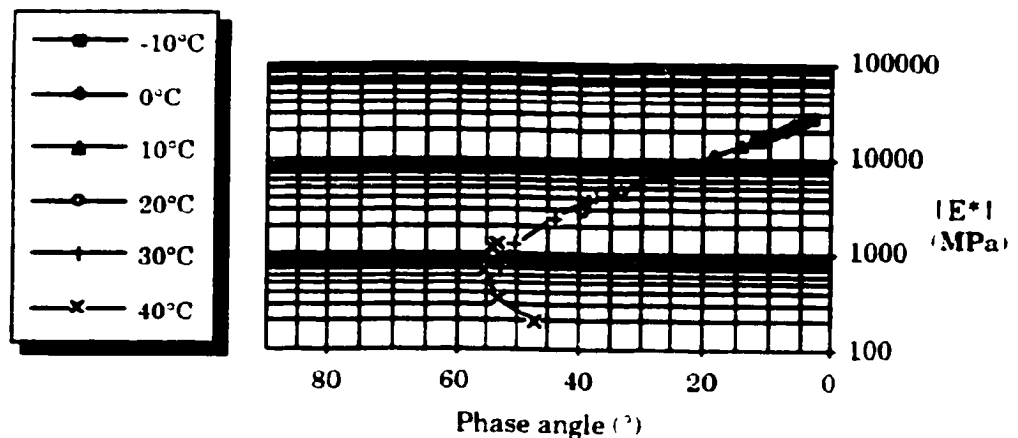


Figure 1.11 : Exemple de courbe d'un essai de module complexe dans un espace Black (Source : Di Benedetto et de la Roche 1998)

1.2.4.3 L'énergie dissipée

Dans les matériaux visqueux, une partie de l'énergie appliquée se dissipe puisque la courbe de charge et la courbe de décharge ne se confondent pas (hystérésis). Dans le plan contrainte-déformation, l'énergie dissipée correspond à l'aire confinée entre la courbe de charge et la courbe de décharge (figure 1.12).

Le travail dissipé (force * déplacement (Beer et Johnston 1998)) par chacun des cycles d'un chargement sinusoïdal en tension-compression pour l'unité de volume du corps viscoélastique est donné par l'expression (Soltani 1998) :

$$W_{cycle} = \oint \sigma d\varepsilon = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin(\varphi) \quad (\text{Éq. 1.8})$$

Dans le cas des enrobés bitumineux, l'énergie dissipée à chacun des cycles diminue lorsque l'essai est effectué en déformation contrôlée tandis qu'elle augmente si l'essai est en contrainte contrôlée (Doucet et coll 2000).

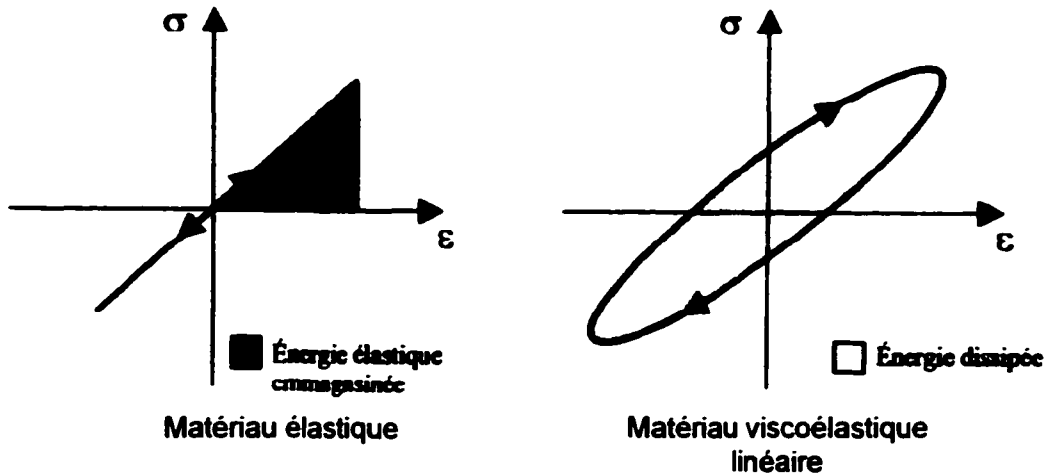


Figure 1.12 : Énergie dissipée et énergie emmagasinée, en fonction du type de matériau testé, représentée dans la relation contrainte-déformation (Source :Soltani 1998)

1.2.4.4 Principe d'équivalence temps-température ou fréquence-température

Les enrobés bitumineux sont des matériaux thermoplastiques et leurs modules complexes varient considérablement avec la température. La figure 1.13 illustre l'influence de la température sur la rhéologie d'un enrobé bitumineux; la rigidité diminue considérablement avec une augmentation de la température.

Comme souligné à la section 1.2.3.2, le module varie selon la vitesse de sollicitation. Pour ces raisons, lorsqu'un module complexe est attribué à un enrobé bitumineux, il est impératif d'y associer une température et une fréquence sans quoi le résultat n'a aucune signification.

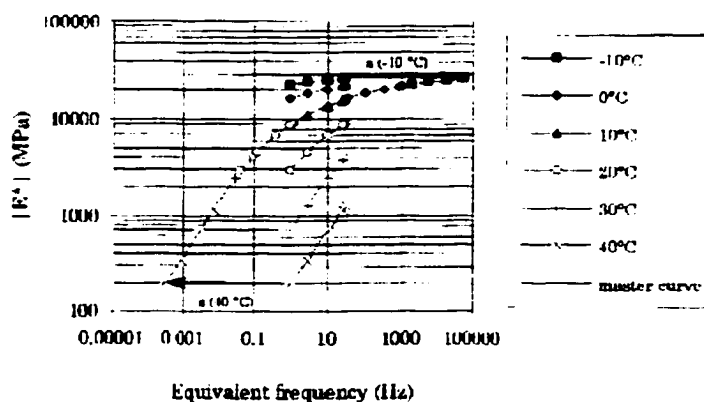


Figure 1.13 :Exemple d'isothermes et d'une courbe maîtresse du module complexe (Source : Soltani 1998)

Le principe d'équivalence temps-température permet d'énoncer que pour certains matériaux, notamment les enrobés bitumineux, l'augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une diminution de la température. Grâce à ce principe, la translation à une température de référence des résultats obtenus à une température donnée est possible en déterminant des fréquences équivalentes. La translation d'une courbe à température donnée, T_i , vers une température de référence, T_{ref} , consiste essentiellement à multiplier ou diviser chaque fréquence par un facteur de translation a_i et à associer la valeur du module mesuré à T_i à cette nouvelle fréquence dans le domaine T_{ref} .

Le principe d'équivalence temps-température (fréquence-température) permet de décrire le comportement rhéologique sur une grande étendue de fréquences de sollicitation et ce, à partir d'essais réalisés sur une plage de sollicitations réduites dans des conditions isothermes.

Le principe d'équivalence temps-température permet aussi de connaître le comportement rhéologique d'un matériau dans des conditions extrêmes de sollicitation, difficilement réalisables par essais en laboratoire; comportement sous l'effet d'un choc (fréquence de sollicitation très rapide) ou sous l'effet d'un fluage (température de sollicitation élevée).

Sur la figure 1.14, le facteur de translation 1 (a_{11}) partant du pivot ω_b et se rendant sur la courbe de 15°C et le facteur de translation 2 (a_{12}), partant du pivot ω_a et se rendant à la courbe de 5°C, sont deux facteurs permettant de couvrir toute la bande de chevauchement entre ces deux isothermes données. À partir de ces deux facteurs de translation, il est possible de calculer un facteur de translation moyen plus représentatif permettant d'étendre la relation entre le module et la fréquence du matériau, établi à priori à 15°C pour une plage de fréquences comprise entre ω_a et ω_b à une plage de fréquences inférieure à ω_a .

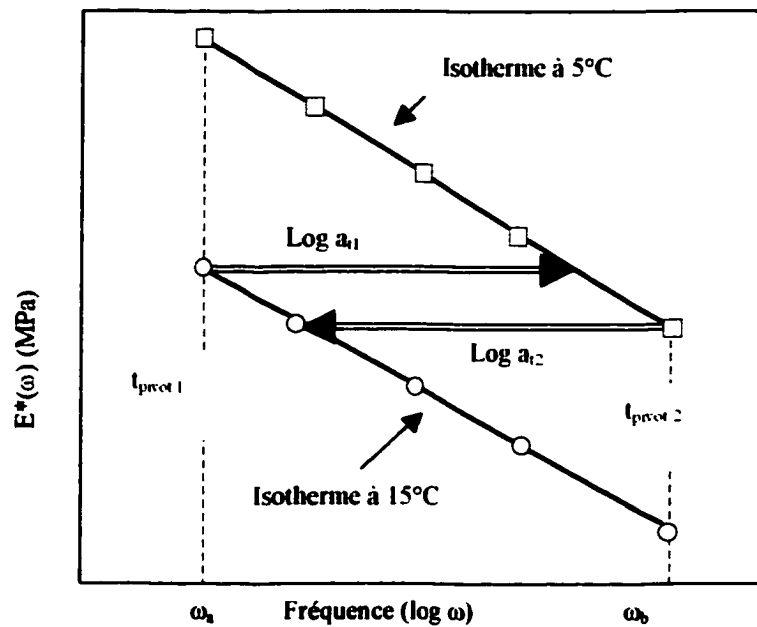


Figure 1.14: Pivot de translation pour trouver la courbe maîtresse

Pour les polymères, la relation de Williams, Landel et Ferry, WLF, peut être utilisée. Le facteur de translation, a_T , est défini par la relation suivante (Aklonis et Macknight 1983) :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (\text{Éq. 1.9})$$

Où C_1 et C_2 sont des constantes qui varient en fonction du matériau testé.

Il semble que la relation de WLF traduit correctement les évolutions obtenues expérimentalement sur les enrobés bitumineux (Di Benedetto et de la Roche 1998 et Neifar 1997).

À partir des résultats du module complexe mesurés à diverses fréquences pour différentes températures d'essais, le facteur de translation à la température de référence pour chacune des isothermes est déterminé. Il est possible de tracer l'évolution du facteur de translation par rapport à la température d'essai (figure 1.15). La valeur du facteur de translation doit prendre une valeur unitaire à la température de référence. Les paramètres C_1 et C_2 sont alors déduits de la relation entre a_T et T (figure 1.15) et de l'équation 1.9.

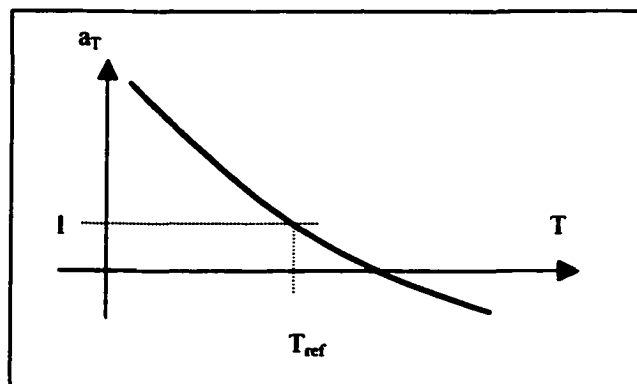


Figure 1.15 : Graphique de l'évolution du facteur de translation avec la température

1.2.4.5 Les courbes maîtresses (Master curve)

Une courbe maîtresse est une courbe isotherme établie à une température de référence qui donne le module par rapport à une plage de fréquences étendue. L'intérêt des courbes maîtresses est non seulement de résumer en une seule courbe toutes les données acquises, mais elles permettent de prévoir les caractéristiques rhéologiques du matériau étudié dans des zones technologiquement intéressantes mais expérimentalement inaccessibles (Bonniot 1993). Les courbes maîtresses sont établies sur la base du principe de correspondance temps-température.

Avant d'en arriver à tracer la courbe maîtresse, il faut d'abord tracer des courbes isothermes. Pour ce faire, des essais sont effectués à diverses fréquences à température constante. Le choix des températures d'essai est crucial afin de permettre l'extrapolation des valeurs du module. Autant que faire se peut, il doit y avoir chevauchement des valeurs des isothermes du module afin de pouvoir trouver le facteur de translation.

Rappelons que le principe d'équivalence temps-température s'applique lorsque l'ensemble des résultats expérimentaux présente une courbe unique dans le plan complexe; le plan Cole-Cole.

1.2.5 Les essais pour déterminer la rigidité d'un enrobé bitumineux

Il existe principalement trois types d'essais pour décrire le comportement viscoélastique linéaire d'un matériau (Di Benedetto 1998a), soit : 1) les essais à chargement sinusoïdal, 2) les essais à chargement monotone en mode temporel et 3) les essais cycliques, à chargement non sinusoïdal. Dans ce mémoire, il n'est question que des essais cycliques mis en application dans le cadre de ce programme expérimental. Pour une faible épaisseur d'enrobé (inférieure à 6 cm) comme la couche de roulement, un essai à déformation contrôlée est mieux adapté qu'un essai à contrainte contrôlée. Il semble que ce soit la déformation et non la contrainte qui endommage les couches minces (Di Benedetto et de la Roche 1998).

1.2.5.1 Mesure du module dans le domaine fréquentiel : les essais cycliques sinusoïdaux

Il faut distinguer les essais qui donnent directement accès au module complexe de l'enrobé, c'est-à-dire les essais homogènes, de ceux qui permettent une estimation de la valeur de module à partir d'une analyse simple d'états de contrainte compliqués (De la Roche, 1996)

Il existe plusieurs essais sous sollicitation cyclique sinusoïdale qui sont normalisés. L'essai de compression dynamique sinusoïdale (ASTM D3497-79) et l'essai par flexion sinusoïdale (NF P 98-260-2) permettent de déterminer le module complexe de l'enrobé. L'essai de traction indirecte pour module résilient (ASTM D 4123-82) que certains auteurs désignent module réversible, donne essentiellement une estimation de la valeur du module.

1.2.5.1.1 L'essai de compression dynamique sinusoïdale

L'essai de compression dynamique sinusoïdale fait l'objet de la norme ASTM D3497-79 *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*. L'essai est conduit à températures et à fréquences variables (trois températures et trois fréquences). Il est important que l'éprouvette en cours d'essai soit toujours en compression. En étant toujours en compression, la contrainte moyenne en cours d'essai est non nulle (figure 1.16).

En imposant une contrainte en compression cyclique de forme sinusoïdale au matériau, une déformation plastique est observable en cours d'essai; c'est le fluage (figure 1.17). Il est très complexe de séparer la déformation élastique de la déformation plastique dans un tel essai puisque les conditions d'essai sont non-homogènes.

L'importance du fluage est fonction de la contrainte. Plus la contrainte est élevée, plus le fluage sera important (Kurz et coll 1989). À partir des résultats obtenus, la norme du module complexe (désigné « module dynamique » par la norme ASTM D3497-79) est calculée en divisant l'amplitude totale de la contrainte imposée par l'amplitude totale de la déformation élastique mesurée. Il est à noter que selon la norme ASTM D3497-79, le module dynamique représente la rigidité de l'enrobé $|E^*|$.

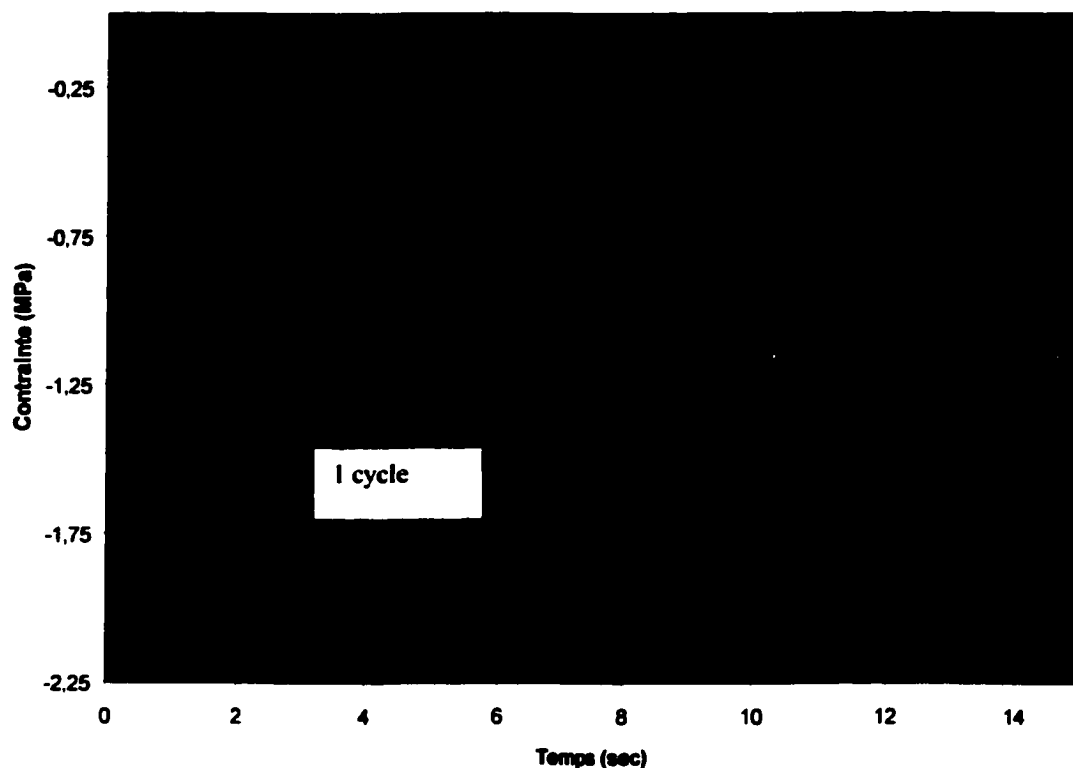


Figure 1.16 : Courbe type de l'évolution de la contrainte sinusoïdale au sein de l'éprouvette toujours en compression effectuée selon la norme ASTM D 3497-79

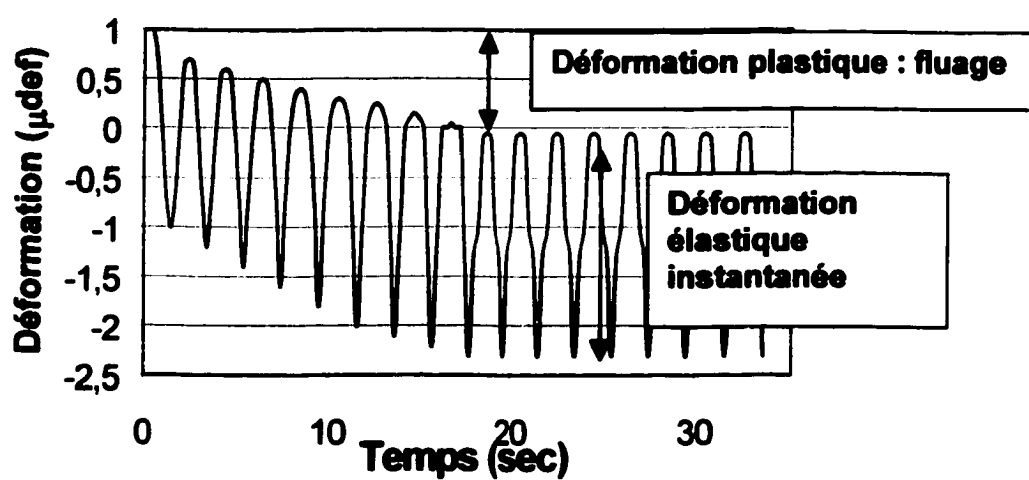


Figure 1.17 : Déformation résultante de la compression cyclique sinusoïdale (Adapté de Perraton et coll 2001)

Selon Di Benedetto (1998b), cet essai serait valable pour préciser les propriétés omierantes d'un enrobé bitumineux, mais demeure difficile d'exploitation pour déterminer les propriétés rhéologiques proprement dites, c'est-à-dire le module complexe de l'enrobé bitumineux (E^*) puisque la structure de l'enrobé évolue en cours d'essai (il y a un rapprochement des particules en cours d'essai).

Finalement, il est important de souligner que le terme dynamique n'est pas représentatif des conditions d'essai. En effet, le terme dynamique indique implicitement que le champ de contrainte au sein de l'éprouvette est sujet à des effets d'onde mettant en jeu des forces d'inertie. Or, ce n'est pas le cas dans ces essais. Les conditions d'essais font en sorte que l'éprouvette est dans un état quasi-statique sous chargement cyclique. Le terme cyclique est donc plus approprié que le terme dynamique (Di Benedetto et De la Roche, 1998).

1.2.5.1.3 L'essai de traction indirecte pour déterminer le module résilient

L'essai de traction indirecte est très semblable à l'essai présenté précédemment à l'exception que l'éprouvette est soumise à un champ de contrainte en tension. Il suffit de placer une éprouvette dans une presse de façon à pouvoir lui appliquer une charge cyclique diamétrale (figure 1.18) (ASTM D 4123-82 *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*).

Une charge sinusoïdale en compression est appliquée sur l'éprouvette de façon à générer une contrainte cyclique de traction indirecte. L'essai peut également être réalisé sous une sollicitation de type impulsion (demi-sinus) avec un temps de repos.

Les résultats de cet essai sont difficiles à exploiter puisque, d'une part, le champ de contrainte au sein de l'éprouvette est fortement non-homogène et que, d'autre part, la déformation irréversible induite par les conditions d'essais force le rapprochement des granulats en cours d'essai ce qui est un mécanisme peu représentatif des conditions réelles sur route. De plus, l'utilisation d'un coefficient de Poisson estimé, généralement à 0,35 réduit la fiabilité des résultats (Doucet et coll 2000). Selon Brown et Foo (1991),

cet essai a une faible répétabilité. La valeur des modules peut varier jusqu'à 35% entre deux échantillons du même enrobé.

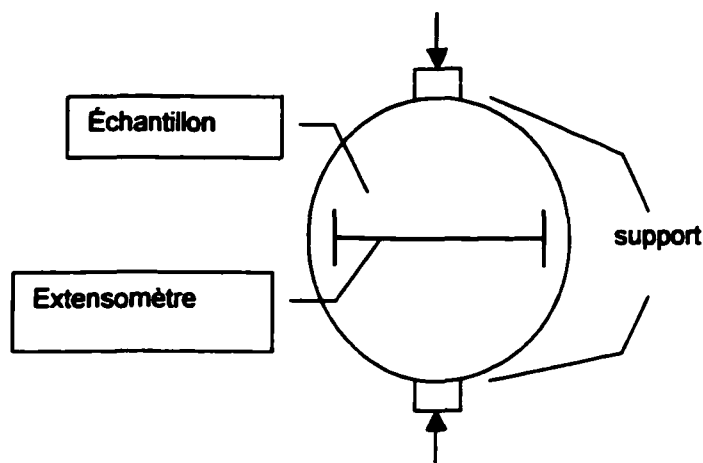


Figure 1.18 : Montage pour essai de traction indirecte

1.2.5.1.2 L'essai de flexion sinusoïdale

L'essai de flexion sinusoïdale est un essai français qui permet de calculer le module complexe (NF P 98 260-2: *Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale*). Un flèche « z » sinusoïdale ($z = z_0 \sin \omega t$) est appliquée en tête d'une éprouvette trapézoïdale collée à sa base à un socle fixe (figure 1.19). La déformation mesurée en tête d'éprouvette lors de l'essai doit demeurer inférieure à $50 \cdot 10^{-6}$. L'essai est réalisé à au moins quatre températures espacées d'au plus dix degrés et à trois fréquences.

Les résultats obtenus par cet essai sont, comme pour l'essai précédent, difficiles à exploiter car l'essai est également un essai non-homogène (Di Benedetto et de la Roche 1998).

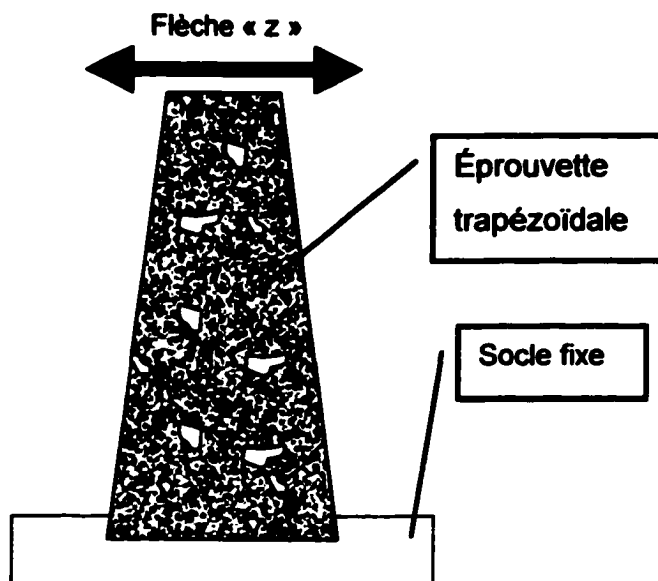


Figure 1.19 : Schéma du montage de l'éprouvette trapézoïdale collée à son socle

1.2.5.2 La mesure du module en fonction du temps : domaine temporel

Une autre méthode utilisée pour déterminer la rhéologie en petites déformations d'un enrobé bitumineux est de mesurer son module sécant, $S(t)$, dans le domaine temporel. La valeur du module sécant est fonction du temps et non de la fréquence comme c'est le cas pour le module complexe.

Le module sécant est déterminé à partir d'essais quasi-statiques suivant une loi de chargement en fonction du temps et en condition isotherme (De la Roche 1996). Le module sécant se définit comme suit :

$$S(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (\text{Éq. 1.10})$$

où :

$\sigma(t)$: contrainte au temps « t » (MPa);

$\varepsilon(t)$: déformation au temps « t ».

Sous l'action d'une contrainte constante imposée, la fonction de fluage $f(t)$ (voir section 1.2.3.2), est donnée par l'évolution du module sécant, soit :

$$f(t) = S(t) \quad (\text{Éq. 1.11})$$

Par ailleurs, sous l'action d'une déformation constante imposée, la fonction de relaxation $r(t)$ (voir section 1.2.3.2), correspond à l'inverse du module sécant (Di Benedetto et de la Roche 1998) :

$$r(t) = \frac{1}{S(t)} \quad (\text{Éq. 1.12})$$

Un bon exemple de la caractérisation des propriétés rhéologiques à petites déformations est le cas de la mesure du module sécant en flexion sur poutre de bitume à basse température : l'essai BBR. L'essai BBR est en soi un essai de fluage permettant de déterminer le module sécant en flexion du bitume. Le module s'écrit :

$$S(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (\text{Éq. 1.13})$$

où :

- P : la charge appliquée (N);
- L : la longueur entre les appuis de la poutre (mm);
- b : la largeur de la poutre (mm);
- h : la profondeur de la poutre (mm);
- $\delta(t)$: la flèche mesurée au centre, au temps « t » (mm) ;
- S(t) : module sécant en flexion (MPa).

Pour les enrobés bitumineux, l'essai de traction directe développé en France (NF P 98-260-1), permet de caractériser le module sécant dans le domaine temporel.

1.2.5.2.1 L'essai de traction directe

L'essai de traction directe est un essai français (NF T 98-260-1, *Détermination du module et de la perte de linéarité en traction directe*). C'est un essai cyclique non sinusoïdal. Une éprouvette cylindrique est soumise à une traction simple selon différentes vitesses de déformations. L'évolution de la contrainte induite dans l'éprouvette est mesurée en cours de sollicitation. Pour une isotherme donnée, l'essai est reconduit pour plusieurs temps de chargements selon une loi de sollicitation de la forme $\varepsilon = at$. La plage des vitesses de chargement est généralement réalisée pour des temps de charge de 1, 3, 10, 30, 100 et 300 secondes. Les essais sont conduits pour plusieurs températures.

L'amplitude de la déformation imposée est normalisée suivant la teneur en liant de l'enrobé, le type de liant (pénétration) et la température d'essai. Elle est comprise entre 50 et 200 $\mu\text{m/m}$ et fixée dans le domaine linéaire du matériau (De la Roche, 1996).

En condition isotherme, pour chacune des vitesses de chargement testées, le module sécant est le rapport de la contrainte maximale observée à la déformation imposée. Di Benedetto et de la Roche (1998) ont montré qu'avec des équations simples, il est possible de trouver une corrélation entre les essais en mode temporel et les essais dynamique présentés précédemment. Par contre, cette corrélation qui est fortement influencée par la température va changer pour chacun des enrobés testés.

1.2.5.3 Comparaison des résultats : module complexe et module sécant

Tel que traité à la section 1.2.3.2.2, la relation entre l'évolution de la déformation, liée à celle de la contrainte pour le cas d'un matériau présentant un comportement VEL, peut se faire à partir de la fonction de relaxation ($r(t)$) et/ou de la fonction de fluage ($f(t)$). Il est important de souligner que le comportement d'un matériau ayant un comportement VEL peut être entièrement connu à partir de l'une ou l'autre de ces fonctions ($r(t)$ ou $f(t)$) (Salençon 1983).

Pour mettre en relation le module complexe et le module sécant, il faut se référer au concept mathématique permettant de définir un domaine de calcul symbolique, désignée domaine des transformées, dans lequel la résolution de certains problèmes est simplifiée. Piau et Linder (De la Roche 1996) ont mis en relief que dans le domaine des transformées de Carson, la fonction de relaxation du matériau, $\tilde{r}(p)$, présente, pour le cas d'une sollicitation sinusoïdale avec le point $p=i\omega$, la même forme que celle du module complexe, $E^*(\omega)$. C'est donc dire que :

$$\tilde{r}(i\omega) = E^*(\omega) \quad (\text{Éq. 1.14})$$

Il devient alors possible de mettre en relation le module complexe $E^*(\omega)$ et la fonction de relaxation $r(t)$, à partir de l'opération de Carson, soit :

$$\begin{array}{ccc} & \text{Calcul symbolique} & \\ & \curvearrowright & \\ r(t) & & \tilde{r}(p) \end{array} \quad (\text{Éq. 1.15})$$

Sachant que la transformée de Carson de la fonction $r(t)$ s'écrit :

$$\tilde{r}(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} r(t) dt \quad (\text{Éq. 1.16})$$

On peut écrire pour le cas particulier où $p = i\omega$:

$$\tilde{r}(i\omega) = E^*(\omega) = i\omega \int_0^{\infty} e^{-i\omega t} r(t) dt \quad (\text{Éq. 1.17})$$

De la même manière, pour la fonction de fluage, on a :

$$\tilde{f}(i\omega) = E^*(\omega) = i\omega \int_0^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (\text{Éq. 1.18})$$

Puisque :

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t) \quad (\text{Éq. 1.19})$$

L'équation 1.17 peut s'écrire :

$$\tilde{r}(i\omega) = \omega \int_0^{\infty} (i \cos(\omega t) + \sin(\omega t)) r(t) dt \quad (\text{Éq. 1.20})$$

Par conséquent, la partie réelle de la fonction de relaxation dans le domaine des transformées de Carson s'écrit :

$$\text{Re}(\tilde{r}(i\omega)) = \omega \int_0^{\infty} \sin(\omega t) r(t) dt = \text{Re}(E^*(\omega)) \quad (\text{Éq. 1.21})$$

En faisant le chemin inverse pour passer du domaine de calcul symbolique des transformées de Carson au domaine temporel, la correspondance entre la fonction de relaxation, $r(t)$, et la partie réelle du module complexe, $\text{Re}(E^*(\omega))$, peut être précisée. On peut également utiliser la transformation de Fourier inverse pour écrire la relation entre $r(t)$ et $\text{Re}(E^*(\omega))$ de l'équation 1.21 soit :

$$r(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}(E^*(\omega))}{\omega} \sin(\omega t) d\omega \quad (\text{Éq. 1.22})$$

Dans le cas d'une loi de déformation imposée de la forme $\varepsilon(t) = at$ (essai de traction directe, section 1.2.5.2.1), le module sécant s'écrit :

$$S(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma(t)}{at} \quad (\text{Éq. 1.23})$$

En VEL, l'évolution de la contrainte sous l'action d'une loi de déformation imposée est décrite par l'équation (1.2, section 1.2.3.2.2), soit :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)r(0) + \int_0^t r'(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau \quad (\text{Éq. 1.2})$$

Dans le cas où la déformation imposée à $t=0$ est égale à zéro sur un matériau n'ayant pas subi d'histoire de sollicitation et sachant que les fonctions $r(\tau)$ et $\varepsilon(\tau)$ sont dérivables, on a :

$$\sigma(t) = \int_0^t r'(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau = \int_0^t r(t-\tau)\varepsilon'(\tau)d\tau \quad (\text{Éq. 1.24})$$

avec $\varepsilon'(t) = a$, l'équation 1.23 peut alors s'écrire :

$$S(t) = \frac{1}{t} \int_0^t r(t-\tau)d\tau \quad (\text{Éq. 1.23a})$$

De la même façon, lorsque la contrainte imposée est de la forme $\sigma(t) = at$, l'équation 1.23 peut s'écrire :

$$S(t) = \frac{t}{\int_0^t f(t-\tau)d\tau} \quad (\text{Éq. 1.23b})$$

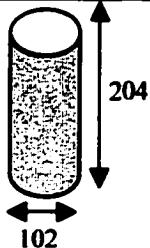
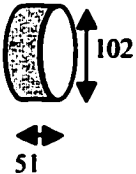
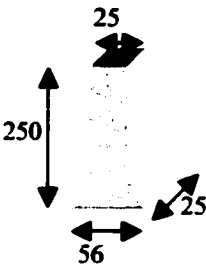
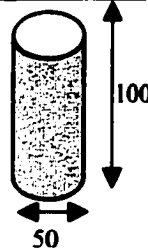
Les relations 1.22, 1.23a et 1.23b permettent d'établir un lien théorique entre le module complexe et le module sécant (Di Benedetto et de la Roche 1998 et De la Roche 1996). En définitive, il est possible de déterminer le comportement rhéologique en mode fréquentiel (le module complexe) à partir d'un essai en mode temporel dans la mesure où soit la fonction de fluage ou celle de relaxation sont définies. Pour ce faire, il convient d'imposer une loi de chargement simple de type : $\sigma(t) = at$ ou $\varepsilon(t) = at$.

1.2.5.4 Synthèse des essais de mesure de la rigidité d'un enrobé

La synthèse des divers essais dont il vient d'être question se trouve dans le tableau I. Dans ce tableau, il est clair que la forme des éprouvettes, la forme du signal, le mode de contrôle, la fréquence et le temps de charge, les températures et les modules mesurés diffèrent beaucoup d'un essai à l'autre.

Tableau I

Synthèse des paramètres pour les divers essais de mesure de la rigidité des enrobés

	Compression dynamique	Traction indirecte	Flexion sinusoïdale	Traction longitudinale
Norme	ASTM D3497-79	ASTM D4123-82	NF P 98-260-2	NF P 98-260-1
Dimensions éprouvettes				
Forme du signal	Sinusoïdal longitudinal	Sinusoïdal transversal	Sinusoïdal transversal	Discontinu longitudinal
Contrôle	Contrainte en compression de 0 à 241 kPa	Contrainte en compression de 10 à 50% de la résistance en traction de l'enrobé	Déformation relative imposée inférieure à $50 \cdot 10^{-6}$	Déformation longitudinale imposée selon enrobé
Fréquence	1, 4, 6 Hz	0,33, 0,5, 1 Hz	3 fréquences avec un rapport minimal de 10 entre elles	-
Temps de charge	-	-	-	Les valeurs choisies doivent permettre de bâtir une courbe maîtresse
Température	5, 25, 40 °C	5, 25, 40 °C	Minimum de 4 température avec 10°C entre chaque	
Module mesuré	Module dynamique Module Complexe	Module résilient	Module dynamique et l'angle de phase Module Complexe	Module sécant

1.2.6 Influence de divers paramètres sur la valeur du module complexe d'un enrobé bitumineux

Deux catégories de paramètres ont une influence marquée sur la valeur du module complexe : les paramètres liés aux conditions de chargement et les paramètres de constitution liés à l'état du matériau et à sa composition (Di Benedetto 1998a).

1.2.6.1 Les paramètres liés aux conditions d'essais

Les paramètres liés aux conditions d'essais sont principalement la fréquence ou le temps de chargement, la température, la vitesse de chargement et le niveau de contrainte. La dimension de l'échantillon testé et l'acquisition des données de l'essai sont également des paramètres d'essais.

La vitesse de chargement - Le module est plus de dix fois supérieur si la contrainte est appliquée en 1 seconde ou en 300 secondes (Perraton et coll 2001). L'influence de la fréquence de sollicitation augmente avec la hausse de la température (Di Benedetto et de la Roche 1998).

La température - La température d'essai a un effet plus marqué sur le module complexe que la fréquence de sollicitation. Selon Tayebali et coll (1994), la température est le paramètre qui a la plus grande influence sur la rigidité d'un enrobé. L'influence de la température est plus grande à basse fréquence (Di Benedetto et de la Roche 1998). Rappelons qu'on peut s'attendre à une perte de 8 à 10 % de la norme du module complexe par degré celcius pour un enrobé bitumineux. Évidemment, à de très basse température, cette perte est moins importante.

Un élément important à prendre en considération lors des essais en laboratoire est l'homogénéité de la température au sein de l'éprouvette. Il est important que la température soit bien contrôlée autour de l'éprouvette, mais également dans l'éprouvette car un gradient de température entraîne des tensions internes (Perraton et coll 2001).

Pour ce qui est de l'angle de phase, il augmente avec la température jusqu'à un plateau au-delà duquel il diminue (Di Benedetto et de la Roche 1998).

Le niveau de contrainte – Comme montré précédemment, le niveau de contrainte fait que le comportement rhéologique du matériau viscoélastique étudié est fortement non-linéaire ou linéaire. Lors d'un essai cyclique sinusoïdal en contrainte alternée (tension-compression), la déformation doit rester sous les 100 micro déformations afin de demeurer dans le domaine linéaire.

La dimension de l'échantillon – Lors des essais en compression, la longueur de l'échantillon peut modifier les résultats par un effet de bout. Lors d'une compression, il y a formation de contrainte dans l'échantillon à partir des bouts jusqu'à environ une longueur de diamètre vers le centre de l'échantillon (Young et coll 1998). Cette contrainte est due à la restriction du mouvement latéral de l'échantillon au niveau du plateau. Afin d'éviter de mesurer cette contrainte lors des essais, des échantillons d'un rapport de longueur diamètre d'au moins 2 :1 sont utilisés. L'utilisation d'instruments de mesure disposés dans la partie centrale de l'échantillon est requise de manière à mesurer seulement la déformation uniaxiale.

L'acquisition des données – Lors d'un essai de mesure du module complexe en chargement cyclique sinusoïdal, un grand nombre de points par cycle sont nécessaires pour faire correctement l'analyse du signal. Selon Soltani (1998), une centaine de points par cycle sont nécessaires. Avec ces points et la règle des moindres carrés, il devient possible de tracer précisément la contrainte et la déformation tout en éliminant les bruits de fond et autres imprécisions qui nuisent à l'analyse des résultats.

1.2.6.2 Les paramètres de constitution

Le type et la teneur en liant, la teneur et le type de filler, le type de granulat et la granulométrie sont les principaux paramètres de constitution jugés significatifs. La teneur en vides et la compacité vont également jouer un rôle prépondérant. Il est important de souligner que les valeurs optimales quant au dosage de chacun des constituants d'un enrobé sont spécifiques à une formulation d'enrobé donnée et aux matières premières utilisées.

Le type de liant - Le type de liant modifie considérablement la rhéologie de l'enrobé : le module complexe et l'angle de phase. Plus un bitume est rigide, plus la norme du module complexe est élevée. L'utilisation de bitumes modifiés avec polymère influence habituellement le module complexe en diminuant leur susceptibilité thermique (Di Benedetto et de la Roche 1998). Il y a une corrélation entre le module complexe mesuré sur le bitume et celui de l'enrobé si les modules sont mesurés dans les mêmes conditions de température et de fréquence (Lesueur et planque 2000).

La teneur en bitume - La teneur en bitume influence aussi de manière significative la rhéologie de l'enrobé. À faible teneur en liant, la norme du module complexe est faible et elle augmente avec la quantité de bitume jusqu'à un optimum au-delà duquel il redescend (Di Benedetto et de la Roche 1998).

La teneur et le type de filler - La teneur en filler joue sur l'épaisseur du film de bitume entourant les granulats. L'accroissement de la quantité de filler semble augmenter la rigidité de l'enrobé (Kavussi et Hicks 1997). Selon Gubler et coll (1998), ce n'est pas tant le fait que le filler diminue la quantité de vides dans le mastic qui fait augmenter la rigidité, mais bien la structure que forment les grains de filler en contact les uns sur les autres. Ce serait la combinaison d'une grande irrégularité de surface et d'une bonne adsorption du filler qui ferait augmenter la rigidité du mastic et par le fait même, la rigidité de l'enrobé (Ishai et Craus 1996). L'augmentation de la rigidité, causée par une grande quantité de filler, a un impact direct sur la maniabilité de l'enrobé, donc sur sa compacité (Shashidhar et coll 1998).

Par contre, dans une étude de Mogawer et Stuart (1996), la rhéologie du mastic a été testée au BBR (*Bending Beam Rheometer*) et aucune corrélation n'a pu être établie entre le type de filler et la performance du mastic. Aucune corrélation non plus n'a été établie entre le type de filler et l'augmentation de la rigidité mesurée au DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) (Harris et Stuart 1995). Le type de filler n'engendre pas de changement à l'essai Marshall non plus selon Kavussi et Hicks (1997).

Les granulats et la granulométrie - Le type de granulats semble avoir très peu d'influence sur le module complexe de l'enrobé. Par contre, l'importance de la qualité des granulats est plus marquée lorsque le bitume a un comportement plus visqueux, soit à haute température et basse fréquence (Di Benedetto et de la Roche 1998 et Doucet et coll 2000). Selon Ishai et Craus (1996), il est normal que la forme et l'irrégularité de la surface des granulats ne changent pas la mesure du module. Dans des essais comme celui du module résilient, ce serait plus l'influence du film de bitume aux différents points de contact dans l'enrobé que la friction des granulats les uns sur les autres qui fait varier la valeur du module. Par ailleurs, la granulométrie n'a pas d'influence directe sur les valeurs de module, si ce n'est que par son effet sur la teneur en air de l'enrobé qu'elle fait varier.

La teneur en vides et la compacité - Les paramètres liés à l'état de l'enrobé sont la teneur en vides et la compacité. La rigidité d'un enrobé bitumineux augmente quand la teneur en vides diminue et ce jusqu'à une valeur optimale (Di Benedetto et de la Roche 1998). Une augmentation de la teneur en vides de 5% à 8% peut amener une réduction de la rigidité de l'enrobé d'environ 20% (Austroads 1999). Cette diminution de la rigidité est due au fait que la surface sur laquelle la contrainte est distribuée est plus petite, lorsqu'il y a une augmentation de la teneur en air, car l'air n'a pas de capacité portante (Harvey 1996). Cette baisse de capacité portante se traduit par une augmentation de la déformation pour une contrainte donnée.

Il est également important de noter que l'impact de la présence des vides est moins important lors d'essais à déformation contrôlée que lors d'essais à contrainte contrôlée (Doucet et coll 2000).

Finalement, puisque la compacité de l'enrobé de la chaussée augmente avec le temps sous l'effet du trafic, une augmentation de la rigidité de l'enrobé pouvant atteindre 60% est observable (Doucet et coll 2000).

1.2.7 Sommaire

Un enrobé bitumineux est un matériau ayant un comportement viscoélastique. Les essais utilisés pour caractériser sa rhéologie, notamment par la mesure du module complexe, doivent tenir compte de bien des facteurs.

La valeur du module complexe permet de caractériser le comportement rhéologique d'un enrobé bitumineux à une température et une fréquence données. La valeur de la norme du module complexe permet d'avoir une idée de la rigidité de l'enrobé tandis que la valeur de l'angle de phase permet de constater s'il y a une prédominance élastique ou visqueuse dans le comportement du matériau étudié.

Les essais peuvent créer un champ de contrainte non-homogène dans l'échantillon ce qui rend difficile l'analyse des résultats. Dans ce cas, l'utilisation de lois de similitude est nécessaire. De plus, pour que le comportement viscoélastique d'un enrobé bitumineux demeure dans son domaine linéaire, l'essai doit être fait à faible déformation pendant un nombre de cycle limité.

Plusieurs paramètres influencent la valeur du module d'un enrobé, soit : les paramètres liés aux conditions d'essais et les paramètres de constitution de l'enrobé. Les paramètres liés aux conditions d'essais sont la vitesse et le niveau de chargement, la température, la dimension de l'échantillon testé et l'acquisition des données. Tous ces facteurs ont une importance de premier ordre sur la valeur du module. Dans les facteurs de constitution qui sont le type et la teneur en liant, le type et la teneur en filler, les granulats et la granulométrie et la teneur en vides, c'est le type de bitume qui a la plus grande influence sur la rhéologie des enrobés bitumineux.

1.3 La performance des enrobés bitumineux à basse température

Comme il vient d'en être question, les enrobés bitumineux ont un comportement viscoélastique. Par contre, lors d'un abaissement de la température, les enrobés bitumineux perdent leur caractère visqueux. L'évaluation de leur performance à basse

température doit donc se faire de manière différente par rapport à ce qui vient d'être exposé.

1.3.1 La fissuration thermique des enrobés bitumineux

La fissuration thermique des enrobés est une des dégradations des chaussées les plus communes en pays nordiques (figure 1.20) (Boutin et Lupien 1999). Les fissures thermiques sont des fissures qui ne sont pas directement reliées au trafic. Elles apparaissent la plupart du temps dans les premières années d'existence de la chaussée (Haas et coll 1987).



Figure 1.20 : Fissure thermique dans un enrobé bitumineux
(Source : Durand et Doré 1993)

Les fissures thermiques sont des fissures transversales qui apparaissent à intervalle régulier. Dans des chaussées neuves, les fissures sont distancées d'environ 30 m tandis que dans des chaussées plus âgées, l'espacement peut être réduit à moins de 3 m (Jung et Vinson 1994).

Les fissures thermiques sont rarement longitudinales, selon l'axe de la route, car il ne se développe pas de tension suffisante en largeur pour faire apparaître des fissures. Si l'espacement entre les fissures transversales est inférieur à la largeur de la chaussée, des fissures longitudinales vont alors apparaître (Jung et Vinson 1994 et Haas et coll 1987).

1.3.1.1 Mécanisme de la fissuration thermique

Lors d'une baisse de la température, le liant de l'enrobé, le bitume, se contracte alors que les granulats s'opposent à cette variation volumétrique, c'est le retrait thermique. Ce retrait thermique induit une tension dans le liant au sein de l'enrobé (Jung et Vinson 1994). Ce phénomène est à l'échelle microscopique dans le matériau. La variation volumétrique différentielle dans l'enrobé entre le granulat et le bitume engendre donc des concentrations de contraintes qui peuvent induire des micro-fissures dans le mastic lorsque ces tensions atteignent la résistance maximale en traction du bitume. Le liant peut se contracter jusqu'à 20 fois plus que les granulats (figure 1.21) (Moran 1998). En effet, le coefficient de dilatation thermique des granulats varie de 5×10^{-6} à 13×10^{-6} mm/mm°C alors que celui du bitume varie de 200×10^{-6} à 600×10^{-6} mm/mm°C (Young et coll 1998).

La situation est un peu différente dans la chaussée. L'effet thermique ne se manifeste pas seulement à l'échelle microscopique mais également à l'échelle de la structure à cause de l'interaction entre les couches de la chaussée. En effet, la friction entre la couche de roulement et la fondation granulaire par exemple limite le retrait thermique d'ensemble de l'enrobé (Boutin et Lupien 1999). Ce phénomène est encore plus marqué lorsqu'une couche de roulement en enrobé bitumineux est posée sur une fondation granulaire stabilisée avec un liant hydraulique ou sur un tablier de béton. C'est essentiellement l'écart entre les coefficients de dilatation thermique des matériaux de chacune des couches de la chaussée qui est à l'origine de ce mécanisme. Lorsque cet écart est tel que la différentielle de déformation entre deux couches induit un champ de contrainte de traction, dans le matériau le plus déformable, il y a fissuration thermique.

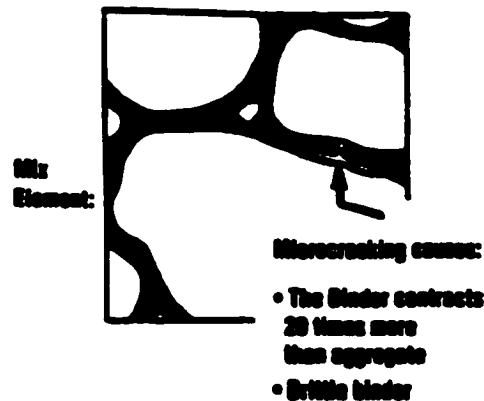


Figure 1.21 : Microfissure créée par le retrait thermique du bitume
(Source : Moran 1998)

À la lumière de ce qui vient d'être énoncé, il est clair qu'il peut y avoir apparition de fissures thermiques dans la couche de roulement lors d'une baisse de la température. D'une part, le coefficient de dilatation thermique d'un enrobé est grand ($\cong 20$ à $30 \cdot 10^{-6}$ mm/mm°C) et, d'autre part, c'est la couche de la chaussée soumise aux conditions climatiques les plus sévères.

Le degré de fissuration va dépendre du taux de refroidissement, de la température atteinte et des matériaux utilisés (Jung et Vinson 1994). Lorsque le taux de refroidissement est lent, les propriétés rhéologiques du bitume permettent un relâchement des contraintes induites par le changement de volume. Par conséquent, si une chaussée est exposée à de basses températures sans pour autant que le bitume ne soit dépourvu de sa capacité de relaxation (température dans l'enrobé supérieure à celle de sa transition vitreuse, T_g), il n'y aurait pas, ou peu, de risque de fissuration thermique (Jung et Vinson 1994).

Étant donné que la température la plus basse dans l'enrobé est à la surface de la chaussée, c'est à cet endroit que les fissures thermiques se développent. Il est à souligner que les fissures par fatigue, lesquelles sont liées au trafic, prennent

naissance à la base de la couche de roulement où la sollicitation mécanique est plus intense. D'après Boutin et Lupien (1999), les fissures thermiques apparaissent presque instantanément sur toute l'épaisseur de l'enrobé. Elles apparaissent lorsque la température critique, température à laquelle l'enrobé perd son élasticité, est atteinte au cœur de l'enrobé (Boutin et Lupien 1999). Cette température critique est différente pour chaque type d'enrobé.

Finalement, des cycles de gel / dégel peuvent également engendrer des micro-fissures au sein de l'enrobé (Isacsson et coll 1997). Avec la répétition de ces cycles, les micro-fissures vont faire place à une fissuration apparente. Ces fissures sont associées à la fatigue thermique du matériau.

1.3.2 Incidence des fissures thermiques

Dans une chaussée, la problématique majeure liée à la présence de fissures dans la couche de roulement est l'infiltration de l'eau et des particules fines. En période de gel, l'eau piégée dans les fissures gèle forçant ainsi l'ouverture des fissures.

La présence de fissures permet également aux sels de déglacage de pénétrer dans la structure de la chaussée. La présence de sels de déglacage peut s'avérer un élément perturbateur critique. Les effets sont différents pour les chaussées avec fondation stabilisée de celle avec fondation granulaire pour laquelle la situation est nettement plus critique. Dans le cas des fondations granulaires, la présence de sels déglaçant tout juste sous la couche de roulement va créer un dégel localisé et une accumulation d'eau changeant ainsi la capacité portante de la fondation. Une réduction localisée de la capacité portante de la fondation et la discontinuité de la couche de roulement créée par les fissures induisent un effet de pompage sous le passage des véhicules, forçant ainsi la mobilisation de particules fines pouvant conduire à une dépression de surface (Jung et Vinson 1994).

1.3.3 La température dans l'enrobé

L'évolution de la température dans l'enrobé, progressive de la surface vers la fondation, va dépendre de plusieurs facteurs, notamment : les propriétés thermiques de l'enrobé, la structure de la chaussée, la géométrie de la route, l'emplacement des tronçons, etc. Cette évolution de la température suit la température ambiante mais avec un certain déphasage (Boutin et Lupien 1999); la température de l'enrobé est toujours plus élevée que la température ambiante, entre autres, à cause de la chaleur radiante du sol. Plus rapidement la température atteint la température critique de l'enrobé, plus rapidement les fissures thermiques vont apparaître (Jung et Vinson 1994). La température critique est la température à laquelle l'enrobé commence à fissurer. Évidemment, la présence de fissures va changer les propriétés thermiques de l'enrobé et par le fait même, tout le processus de la fissuration.

Afin de pouvoir faire la relation entre la température de la surface de l'enrobé et la température à une profondeur z dans l'enrobé, certaines équations de régression ont été développées. Boutin et Lupien (1999) proposent une relation qui est valable pour des épaisseurs d'enrobés de 100 mm et plus :

$$T_z = -0,3794 + 0,7193T_{\text{air}} + 0,0411z \quad (\text{Éq. 1.25})$$

Où :

- T_z est la température à la profondeur z (°C);
- T_{air} est la température de l'air (°C);
- z est la profondeur à partir de la surface (mm).

Par ailleurs, le programme Strategic Highway Research Program (SHRP) propose également deux relations empiriques pour estimer la température au sein de l'enrobé (Kennedy et coll 1994). La première donne la température maximale et la seconde la température minimale à la profondeur z dans l'enrobé. Contrairement à la relation proposée par Boutin et Lupien (1999), ces dernières utilisent la température de surface de l'enrobé. Par conséquent, elles sont moins pratiques puisque cette température n'est pas aussi facilement accessible que la température de l'air ambiant.

1.3.4 Facteurs déterminants pour la performance à basse température d'un enrobé bitumineux dans le contexte de la chaussée

Globalement, les facteurs déterminants quant à la performance à basse température d'une couche de roulement peuvent être séparés en trois grandes catégories : la géométrie de la route, les facteurs environnementaux et les matériaux. (Jung et Vinson 1993 et 1994, Isacsson et coll 1997 et Moughabghab 1994).

La géométrie de la route et la structure de la chaussée jouent un rôle déterminant sur la performance de l'enrobé à basse température. La largeur de la chaussée, l'épaisseur de la couche d'enrobé, la friction entre les couches de la structure de la chaussée ainsi que le type de sol support sont des facteurs influents. Plus la chaussée est large, plus les fissures transversales liées aux effets thermiques seront espacées (Jung et Vinson 1994). Également, plus un enrobé est épais, moins il fissure; en doublant l'épaisseur de l'enrobé, le nombre de fissures diminue de moitié (Laveissière et Petit 1998). Finalement, si l'enrobé est posé sur un sol support pulvérulent, les fissures seront plus fréquentes que sur un sol support cohésif (Jung et Vinson 1994).

Dans l'évaluation de la durabilité à la fissuration thermique d'un enrobé, l'humidité relative de l'air ambiant est également un facteur important à prendre en considération. Une étude réalisée sur 13 sections de routes aux États-Unis a montré qu'une augmentation de l'humidité relative a tendance à améliorer les performances de l'enrobé face à la fissuration thermique (Kim et coll 1994).

1.3.5 Méthode en laboratoire pour évaluer la performance à basse température d'un enrobé bitumineux : l'essai en retrait thermique empêché

Bien qu'il existe des méthodes numériques pour estimer la performance des enrobés à basse température, ce sont les essais en laboratoire qui sont les plus utiles à la compréhension de la fissuration thermique. Pour évaluer la performance à basse température d'un enrobé, SHRP propose de mesurer la contrainte de rupture en

condition de retrait thermique empêché (AASHTO TP10-93, *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*). Une description détaillée de l'essai et des paramètres importants à prendre en considération mérite d'être exposé.

1.3.5.1 Description et principe de l'essai de TSRSTS

Un échantillon d'enrobé est placé dans une enceinte à température contrôlée dans laquelle la température est abaissée selon un taux de refroidissement constant (10°C/h) tout en restreignant le mouvement de l'éprouvette (Jung et Vinson 1994). Sous l'effet du retrait thermique empêché de l'enrobé, il se crée un état de contrainte au sein de l'éprouvette qui s'intensifie en cours de refroidissement. Lorsque la contrainte induite par le retrait thermique empêché est supérieure à la résistance en traction de l'enrobé, l'échantillon se rompt. L'évolution de la température de l'échantillon et de la tension dans l'enrobé est enregistrée du début du processus de refroidissement jusqu'à la rupture. Les paramètres d'essais sont inscrits au tableau II.

Contrôle de la température en cours d'essais – En cours d'essai, un élément important est lié au fait que la température de l'enceinte ne correspond pas à la température de l'échantillon (Neifar 1997). De surcroît, il existe au sein même de l'éprouvette une différentielle de température entre le cœur et la surface. Cette différentielle est d'autant plus significative que le taux de refroidissement de l'enceinte est rapide.

Le taux de refroidissement est contrôlé par ordinateur à l'aide de thermocouples installés dans l'enceinte et non sur l'échantillon. Le refroidissement est obtenu mécaniquement ou à l'aide d'azote liquide.

Tableau II
Paramètres de l'essai de retrait thermique empêché : essai TSRSTS

Paramètres	Exigences norme AASTHO TP10-93
Diamètre des échantillons (mm)	60 ± 5
Longueur des échantillons (mm)	250 ± 5
Taux de gel ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	10 ± 1
Température de départ ($^{\circ}\text{C}$)	5 ± 2
Durée du conditionnement (h)	$6 \pm 0,5$

(Source : AASHTO TP10-93)

Selon les travaux de De la Roche (Neifar 1997) pour une éprouvette de 80 mm de diamètre soumise à un taux de refroidissement infini, le délai pour la stabilisation de la température entre la surface et le cœur est de l'ordre de 10 à 15 minutes; soit un delta compris entre 1,8 et 2,5 $^{\circ}\text{C}$.

Les travaux de De la Roche ont mis en évidence que le temps nécessaire pour atteindre la température cible pour une éprouvette de 80 mm de diamètre placée d'un milieu à 25 $^{\circ}\text{C}$ vers un milieu à 0 $^{\circ}\text{C}$ est le même pour le cœur de l'éprouvette que pour la surface. Par conséquent, l'équilibre thermique de l'éprouvette peut être considéré atteint en se basant uniquement sur la température à la surface de l'éprouvette (Neifar 1997).

1.3.5.2 Les résultats de l'essai de retrait thermique empêché

Les résultats d'un essai de retrait thermique empêché permet de tracer l'évolution de la température et de la tension jusqu'à la rupture de l'échantillon. La figure 1.22 illustre une relation type de l'évolution de la contrainte induite au sein de l'éprouvette en condition de retrait thermique empêché sous l'effet d'un taux de refroidissement de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$.

La figure 1.22 montre que la tension induite au sein de l'éprouvette par le retrait thermique empêché augmente graduellement à mesure que la température diminue.

Également, l'évolution de la relation contrainte-température présente un changement de courbure pour devenir quasiment linéaire à partir d'une certaine température (Jung et Vinson 1994). La température qui marque ce changement est désignée comme étant la température de transition vitreuse, T_g , correspondant à environ -11°C sur la figure 1.22. En deçà de cette température, les propriétés rhéologiques du bitume font en sorte qu'une partie des tensions induites par le changement de température, est dissipée par le phénomène de la relaxation qui est associé à sa partie visqueuse.

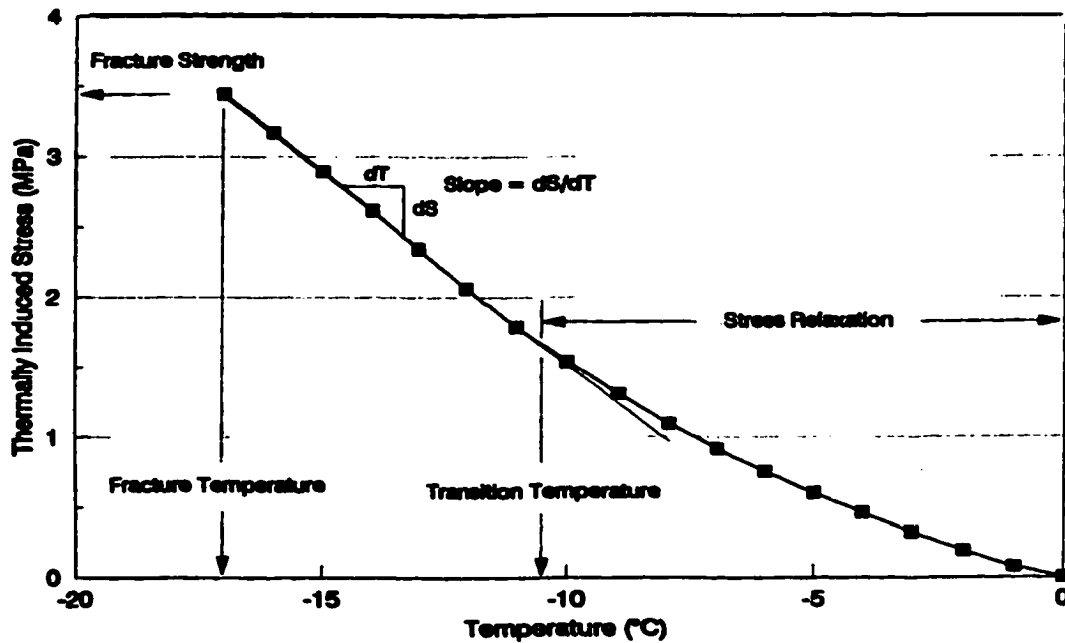


Figure 1.22: Courbe type d'un essai de retrait thermique empêché (source : Jung et Vinson 1994)

Selon Migliori et coll (1996), la température de transition vitreuse présente un bon degré de corrélation avec la température de Fraass, même si cette dernière est plutôt controversée :

$$T_{\text{Fraass}} = 0,717T_g + 4,3 \quad (\text{Éq. 1.26})$$

Où T_g représente la température de transition vitreuse du bitume et non de l'enrobé.

Finalement un point intéressant fourni par la relation entre l'évolution de la température et celle de la contrainte interne dans l'éprouvette en cours d'essais est la pente de la droite après la température de transition vitreuse. Cette pente donne une indication de la sensibilité thermique de l'enrobé. Plus la pente est forte, plus les tensions thermales induites augmentent rapidement en fonction de la température. Cette sensibilité thermique de l'enrobé est fortement tributaire de celle du bitume puisque les conditions d'essai font en sorte que le matériau est soumis à un champ de contrainte en tension de sorte que le bitume est fortement sollicité; la masse granulaire n'a que peu d'influence (figure 1.23).

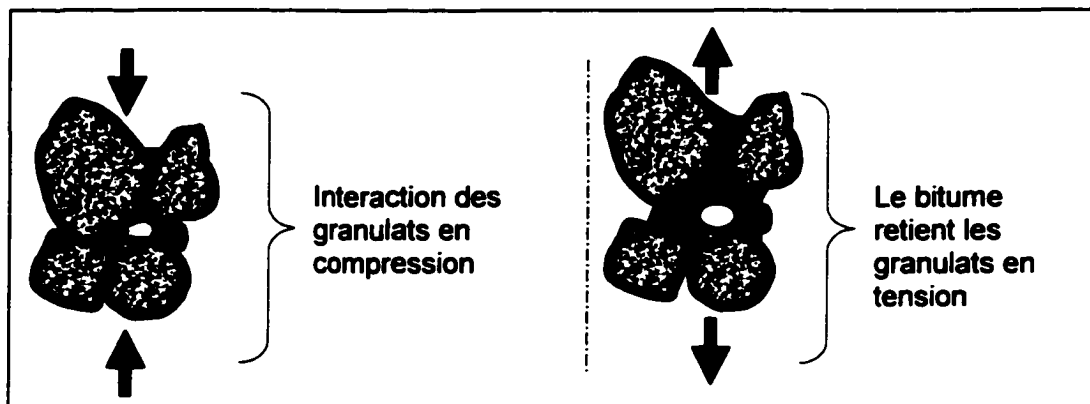


Figure 1.23: Interaction entre les granulats et le bitume
(Adapté de Perraton et coll 2001)

En définitive, à partir de l'essai de retrait thermique empêché, la performance à basse température de l'enrobé est caractérisée à partir des paramètres suivants : la température, la contrainte de rupture, le T_g et la pente de la relation contrainte-température en deçà du T_g .

1.3.5.3 Facteurs déterminants pour la performance à basse température de l'enrobé évaluée à partir de l'essai de retrait thermique empêché

Les facteurs déterminants pour la performance d'un enrobé à l'essai de retrait thermique empêché peuvent être séparés en deux grandes catégories, soit les paramètres d'essais et les paramètres de constitutions de l'enrobé.

1.3.5.3.1 Les paramètres d'essais

Lors d'un essai de retrait thermique empêché, le taux de refroidissement et les dimensions des échantillons testés sont les paramètres qui sont le plus souvent modifiés.

Taux de refroidissement - Sur site, le taux de refroidissement d'un enrobé peut varier considérablement. La vitesse de refroidissement est influencée par la température ambiante et la vitesse du vent (Moughabghab 1994 et Jung et Vinson 1994). Au Canada, le taux de refroidissement ne dépasse habituellement pas 5°C/h; normalement, le taux de refroidissement se situe autour de 1°C/h (Anderson et coll 1999).

La température de rupture lors d'un essai de retrait empêché augmente avec l'augmentation du taux de refroidissement jusqu'à 5°C/h alors qu'elle diminue un peu à un taux de refroidissement plus élevé (Jung et coll 1994) (figure 1.24). Les résultats présentés à la figure 1.24 montrent que la pente tend à augmenter avec le taux de refroidissement. Une pente faible indique que pour une variation de température donnée, les tensions induites dans l'éprouvette sont moindres, et par conséquent, la susceptibilité thermique de l'enrobé est moindre. Les résultats présentés à la figure 1.24 montrent également que la contrainte de rupture évaluée en retrait thermique empêché change avec le taux de refroidissement. En fait, le taux de refroidissement a nettement plus d'influence sur la contrainte de rupture que sur la température de rupture (Fabb, 1974). Un taux de refroidissement élevé laisse moins de temps au phénomène de relaxation de se manifester rendant ainsi l'enrobé plus vulnérable à la fissuration thermique.

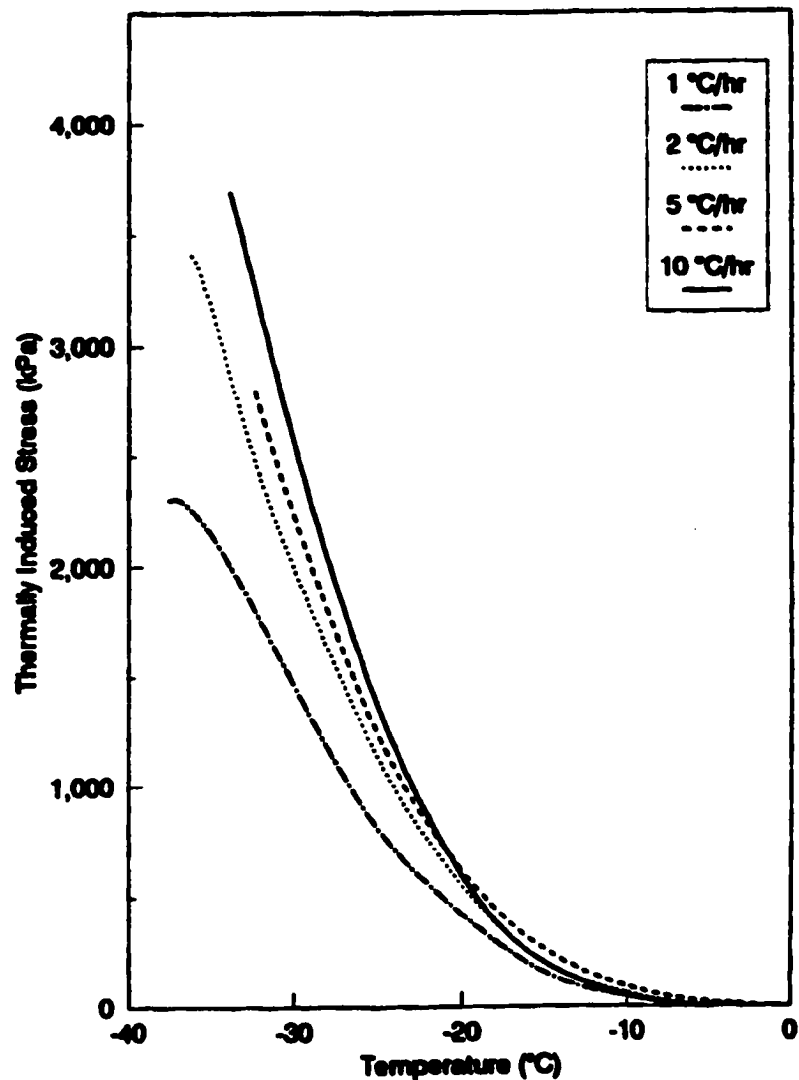


Figure 1.24 : Influence du taux de refroidissement sur la température et la tension de rupture (Source : Jung et Vinson 1994)

La dimension de l'échantillon – Les résultats d'essai au TSRSTS varient en fonction de la taille des éprouvettes. Un échantillon de 80 mm de diamètre fissurera à une température moins élevée qu'un échantillon de 60 mm de diamètre alors que sa contrainte à la rupture sera inférieure. Plus un échantillon est gros, plus sa température de rupture sera basse (Jung et Vinson 1994). Cette différence est due au gradient thermique entre la surface et le cœur de l'éprouvette; ce gradient est plus

grand pour un diamètre de 80 mm que pour un diamètre de 60 mm (Perraton et coll 2001).

1.3.5.3.2 Les paramètres de constitution

Comme souligné précédemment, l'enrobé est constitué principalement de trois phases : le bitume, la masse granulaire (granulats et filler) et l'air (les vides). Dans ce mémoire, il n'est pas question en détails de l'effet des additifs qui sont parfois utilisés dans les enrobés pour modifier ces caractéristiques mécaniques. L'effet de chacune des trois phases sur la performance au TSRSTS sera traité sommairement.

Le Bitume - La plupart des auteurs s'accordent pour dire que le module de rigidité du bitume est une des principales caractéristiques qui conditionnent la performance à basse température de l'enrobé (Jung et Vinson 1994 et Isacsson et coll 1997). Il existe plusieurs essais pour caractériser à basse température le bitume : l'essai de pénétration (PVN, PI), la mesure de la rhéologie par un essai de flexion sur poutre de bitume (BBR) ou par un essai en traction directe. Néanmoins le BBR et la traction directe sont les essais les plus utilisés actuellement pour la caractérisation à basse température d'un bitume.

Le bitume a un coefficient de dilatation thermique plus grand que celui de la plupart des granulats. Donc, plus il y a de bitume, plus le coefficient de dilatation global de l'enrobé va augmenter (voir annexe 1). Un coefficient de dilatation thermique élevé implique une plus grande susceptibilité thermique du matériau. Par contre, une plus grande quantité de bitume change également la rhéologie de l'enrobé. En effet, une teneur plus élevée en bitume dans l'enrobé diminue sa rigidité ce qui se traduit par une meilleure performance face à la fissuration thermique puisque sa déformabilité est augmentée (Jung et Vinson 1994). Ces deux effets s'opposent. Tant et aussi longtemps que la quantité de bitume demeure autour de la valeur optimale, la teneur en bitume n'a pas une grande influence sur la fissuration thermique de l'enrobé (Jung et Vinson 1994).

L'âge de l'enrobé est directement relié au vieillissement du bitume, et représente un facteur important face à sa résistance à la fissuration thermique (Asphalt Institute 1981). En laboratoire, pour faire vieillir un bitume, de l'air chaud est insufflé sur le bitume afin d'accélérer son vieillissement par oxydation (PAV, RTFOT). Lors de l'oxydation, le bitume durcit suite à l'évaporation d'une partie des maltènes ce qui fait que la partie occupée par les asphaltènes, plus rigide, augmente (Young et coll 1998). En étant plus rigide, l'enrobé confectionné avec un bitume oxydé présente au TSRSTS une température de rupture et une température de transition vitreuse plus élevées que celui confectionné avec un bitume non vieilli. Selon Jung et coll (1994), en faisant vieillir le bitume à des températures plus hautes (135°C vs 110°C), la différence des résultats au TSRSTS est encore plus marquée (figure 1.25).

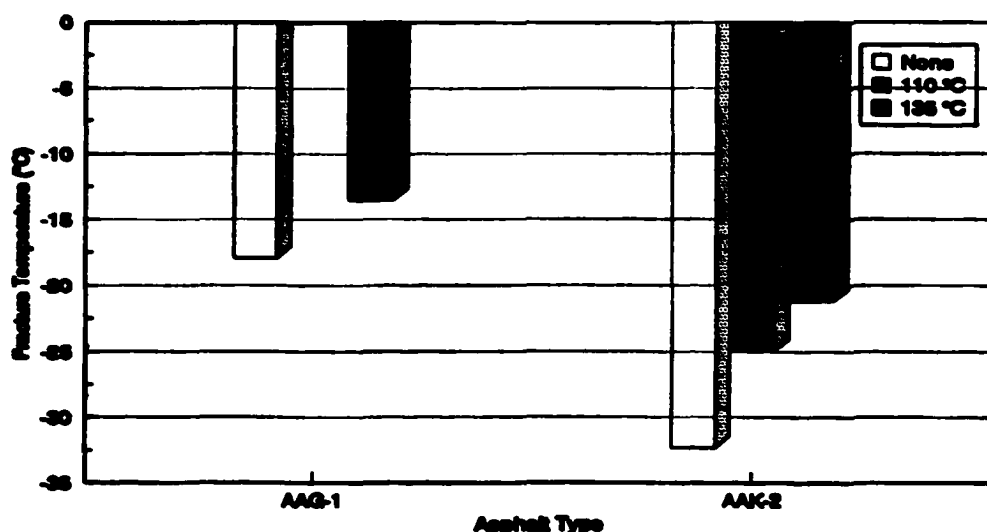


Figure 1.25: Influence de l'âge de l'enrobé sur la température de rupture
(Source : Jung et Vinson 1994)

Certains auteurs associent la susceptibilité thermique de l'enrobé à celle du bitume. Le PVN (penetration viscosity number) est un indice qui donne la susceptibilité thermique du bitume. Un bitume avec une grande susceptibilité thermique est un bitume dont la viscosité change beaucoup en fonction de la température. Le PVN se définit comme suit (Boutin et Lupien 1999) :

$$PVN = \frac{-1.5 (L - \log_{10} \eta)}{(L - M)} \quad (\text{Éq. 1.27})$$

Où :

L : 4,258-0,79674 log₁₀ (PEN);

M : 3,46289-0,61094 log₁₀ (PEN);

η : viscosité du bitume à 135°C (cSt) : viscosimètre de Brookfield;

PEN : indice de pénétration à 25°C.

Susceptibilité thermique basse PVN > -0,6;

Susceptibilité thermique moyenne -1,0 < PVN < -0,6;

Susceptibilité thermique grande PVN < -1,0.

Un enrobé confectionné avec un bitume qui a une grande susceptibilité thermique aura également une grande susceptibilité thermique.

Les Granulats - La granulométrie des granulats de l'enrobé a peu d'influence sur la température de rupture des enrobés au TSRSTS. Le type de granulométrie (dense ou fermée, ouverte ou grenue, à matrice de pierre) a également peu d'influence (Isacsson et coll 1997). Selon Jung et Vinson (1994), la granulométrie n'a pas une grande influence sur la fissuration thermique tant qu'elle donne un enrobé qui résiste à l'orniérage. Les écarts observés proviennent du fait que la granulométrie grenue modifie le degré de compaction de l'enrobé. En fait, plus un enrobé est grenu, plus sa teneur en vides est élevée. La présence de vides a pour effet de favoriser le vieillissement du bitume et, par conséquent, de changer la température de rupture (Isacsson et coll 1997).

Par contre, l'absorptivité des granulats a un effet significatif sur la résistance à la fissuration thermique des enrobés. Si les granulats absorbent trop de bitume, le volume de bitume effectif diminue. En ayant ainsi moins de bitume qui participe à la résistance en traction, cette dernière diminue (Moughabghab 1994).

Il est intéressant de souligner que l'utilisation de particules de caoutchouc comme granulat provenant de pneus recyclés, dry process, peut être bénéfique pour améliorer la résistance à la fissuration thermique des enrobés. Avec 4% de particules de caoutchouc, la résistance en tension à basse température de l'enrobé augmente. Néanmoins, l'ajout de particules de caoutchouc augmente le coût de l'enrobé (Hui et coll 1994).

Le filler - Une étude sur 18 fillers différents a montré que le type de filler utilisé n'avait pas d'effet notable sur la résistance à la fissuration thermique (Mogawer et coll 1996). Les fillers utilisés dans cette étude sont du grès, du calcaire du granite et des cendres volantes. Par contre, l'ajout de filler au bitume réduit la susceptibilité thermique du mastic (Cupo-Pagano et coll 1997).

La compacité - Dans un enrobé bitumineux, tout comme pour tout les matériaux, la compacité est inversement proportionnelle à la quantité de vides. La teneur en vides modifie le comportement à basse température de l'enrobé. La figure 1.26 montre la synthèse des résultats de Jung et Vinson (1994) d'une étude menée pour évaluer

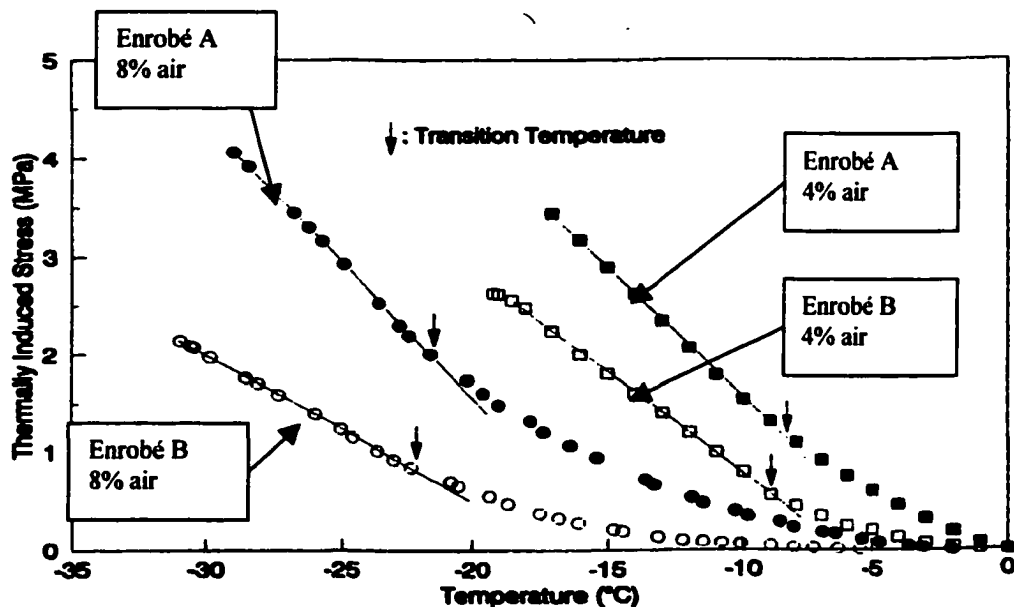


Figure 1.26: Effet du volume des vides sur la fissuration thermique lors d'un TSRSTS (Adapté de Jung et Vinson 1994)

l'influence de la teneur en vide des enrobés sur la performance au TSRSTS. À la lueur des résultats présentés à la figure 1.26, une augmentation de la compacité d'un enrobé a pour effet d'augmenter sa température de transition vitreuse (T_g) et de modifier sa susceptibilité thermique et sa température de rupture (la pente en deçà de T_g).

Selon Rodriguez et coll (1996) la raison pour laquelle un enrobé moins dense a une meilleure performance à basse température n'est pas claire. Cette bonne performance est due soit à : 1) un mécanisme d'écoulement visqueux qui facilite la relaxation des contraintes ou à 2) la formation d'un grand nombre de micro-fissure stable.

1.3.6 Sommaire

Les fissures thermiques sont des fissures transversales qui ne sont pas reliées au trafic. Il y a fissuration thermique lorsque la tension induite par la dilatation thermique du bitume est plus grande que la résistance en traction de ce dernier. C'est la différence dans l'amplitude de la déformation entre les granulats et le bitume ou bien entre la couche d'enrobé et son sol support qui amène l'augmentation de la tension.

La performance à basse température de l'enrobé est influencée par trois grands facteurs, soit : la géométrie de la route, les matériaux utilisés et les facteurs environnementaux.

L'essai en laboratoire le plus représentatif des conditions réelles est l'essai de retrait empêché. Cet essai consiste à fixer un échantillon d'enrobé dans une presse et à abaisser la température à taux fixe tout en empêchant l'échantillon de se contracter. L'évolution de la contrainte en fonction de la température est notée. Les facteurs modifiant les résultats de l'essai de retrait empêché sont soit liés à l'essai ou à la constitution de l'enrobé. Les facteurs liés à l'essai sont le taux de refroidissement et la dimension de l'échantillon. Ces deux facteurs changent considérablement les résultats. Le facteur de constitution ayant le plus gros effet est le type de bitume. Les autres facteurs qui sont : la quantité de bitume, les granulats et la granulométrie, le

type et la quantité de filler et la compacité n'ont que très peu d'effet sur la température de rupture, la température de transition vitreuse, la contrainte à la rupture ou bien sur la susceptibilité thermique.

CHAPITRE 2

SÉLECTION DU TYPE D'ESSAI, DES PARAMÈTRES D'ESSAIS ET DES CONSTITUANTS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS BITUMINEUX TESTÉS

2.1 Introduction

Le principal objectif de notre programme expérimental est de définir une méthodologie pour permettre la caractérisation en laboratoire de deux aspects des enrobés bitumineux, soit : 1) les propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux et 2) leur résistance à la fissuration thermique.

Le chapitre II présente la réflexion faite face au choix du type d'essai, des paramètres d'essai et des divers constituants des enrobés bitumineux à tester. Dans un premier temps, le choix des essais et des paramètres d'essais sont développés pour la mesure des propriétés rhéologiques et pour la mesure de la résistance à la fissuration thermique. Dans un deuxième temps, le choix de l'enrobé et de ses constituants est abordé.

2.2 Réflexions quant à la sélection du type d'essai

L'évaluation des paramètres d'un enrobé tel que le module complexe et la résistance à basse température nécessite d'avoir un appareillage sophistiqué. Le laboratoire universitaire sur les chaussées, les routes et les enrobés bitumineux, le LUCREB, a fait l'acquisition d'une nouvelle presse MTS permettant de tester des enrobés bitumineux dans des conditions critiques. À partir de l'équipement disponible, il convient de d'abord sélectionner un type d'essai approprié pour mesurer les propriétés rhéologiques et un autre pour mesurer la résistance à la fissuration thermique d'un enrobé. Par la suite, il faut établir les paramètres de ces essais.

En fait, ce n'est que dans le cas de la mesure des propriétés rhéologiques de l'enrobé que la réflexion s'impose, puisque la revue de la documentation a permis de valider la performance de l'essai TSRSTS pour évaluer la résistance à basse température d'un

enrobé bitumineux. Actuellement, au niveau international, l'essai au TSRSTS peut être considéré comme l'essai de référence dans la caractérisation de la résistance à basse température des enrobés bitumineux.

2.2.1 Mesure des propriétés rhéologiques de l'enrobé

La revue de la documentation a permis de mettre en relief deux approches distinctes pour évaluer les propriétés rhéologiques des enrobés, soit en cherchant à :

1. préciser la fonction de fluage du matériau (essais monotones);
2. élaborer l'évolution de son module complexe (essais cycliques).

À ce stade de notre réflexion, il est requis de statuer sur les conditions de sollicitation auxquelles l'enrobé est soumis dans la chaussée.

Les conditions de sollicitation de l'enrobé vont varier en fonction de la structure de la chaussée mise en oeuvre et de l'emplacement considéré. En effet, dans certains cas, la structure de la chaussée est constituée d'une fondation et d'une sous-fondation granulaire alors que, dans d'autres cas, la fondation granulaire est stabilisée.

Des mesures in-situ ont permis de préciser l'évolution de la déformation à la base de la couche de roulement, l'emplacement le plus sollicité lors du passage d'un véhicule. Un résultat type de ces mesures est présenté à la figure 2.1.

La figure 2.1 montre que la déformation mesurée à la base de la couche de roulement d'une chaussée au point A passe successivement par un état de compression, à l'approche d'un véhicule, à un état de tension lorsque le véhicule se trouve tout juste au-dessus du point A, et revient dans un état de compression lorsque le véhicule s'éloigne. L'allure générale du signal est presque symétrique par rapport au point A; si ce n'est de l'amplitude plus faible de la contraction lors de l'éloignement de la charge. L'allure du profil de la déformation au point A, liée au passage d'un véhicule,

s'apparente à un profil sinusoïdal. Toutefois, il est clair que la déformation en compression est beaucoup moins importante que la déformation en tension (Di Benedetto et de la Roche 1998).

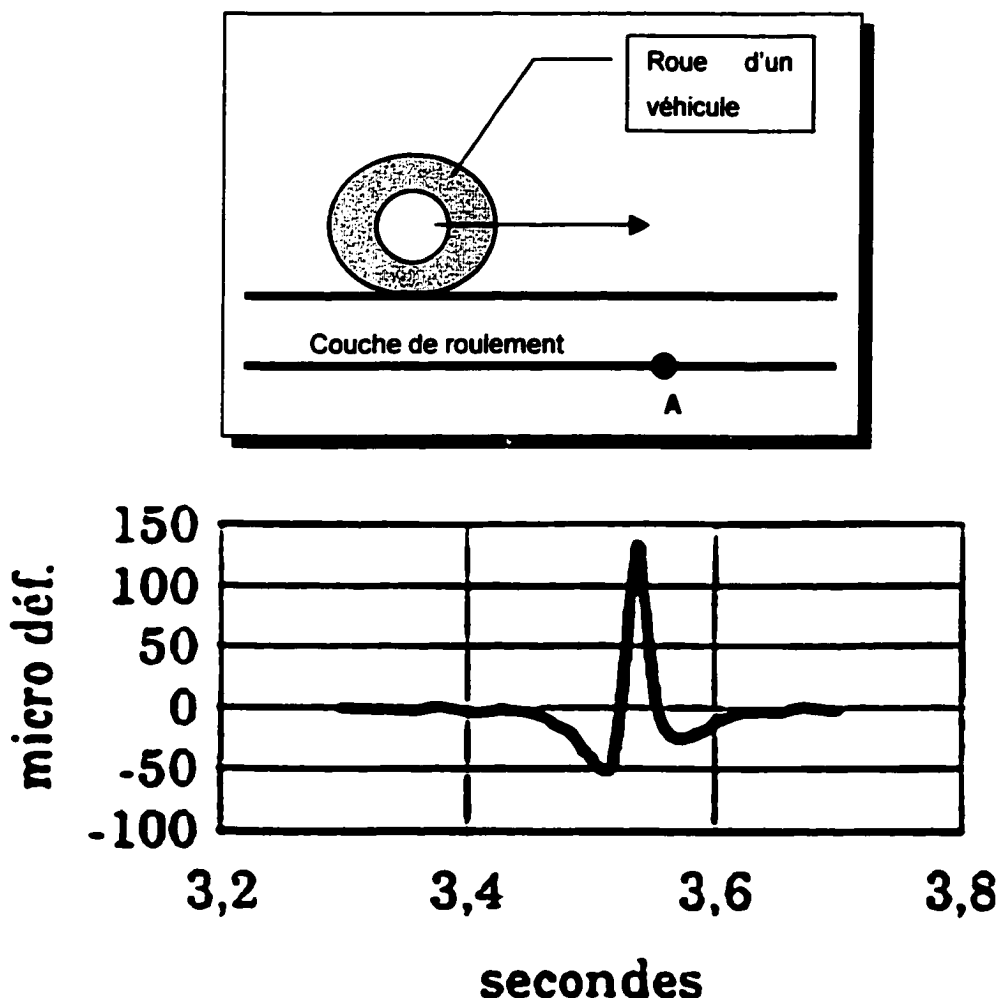


Figure 2.1 : Déformation à la base de la couche de roulement, au point A, lors du passage d'une charge (Adapté de Doucet et coll 2000)

Dans le cas d'étude en fatigue, il est admis que la forme propre du signal n'a pas beaucoup d'influence (Soltani 1998). L'analyse de Soltani apporte quelques éléments de réflexion :

La sollicitation couramment rencontrée en fatigue est le chargement sinusoïdal exercé en continu et centré sur zéro de force. Le choix se

justifie en faisant l'hypothèse que c'est l'amplitude et non la forme du signal qui influence principalement les résultats.

Dans ce contexte, certains essais mis en œuvre pour évaluer les propriétés rhéologiques d'un enrobé ont été développés suivant un chargement cyclique, à variation sinusoïdale, permettant de calculer le module complexe.

En définitive, mentionnons que :

1. l'enrobé est sollicité en contrainte alternée (tension-compression) à la base de la couche de roulement;
2. la forme du signal rencontré dans la chaussée à la base de la couche de roulement s'apparente à un signal sinusoïdal;
3. la description du comportement rhéologique d'un matériau VEL est simplifié dans le cas d'un essai homogène sous chargement cyclique sinusoïdal;
4. la presse MTS du LUCREB permet de générer facilement une sollicitation sinusoïdale.

Par conséquent, les propriétés rhéologiques de l'enrobé sont facilement accessibles par l'étude de l'évolution du module complexe à partir d'un essai uniaxial cyclique sinusoïdal en contrainte alternée.

2.2.2 Résistance à basse température

Dans le chapitre I, il est mentionné, qu'à l'échelle microscopique, c'est la différence de variation volumétrique entre les granulats et le bitume qui cause la fissuration thermique. Il est également précisé qu'à l'échelle de la structure, la friction entre l'enrobé et la couche sous-jacente empêche la libre contraction thermique de l'enrobé. L'essai TSRSTS reproduit bien cette situation en empêchant la variation volumétrique globale de l'échantillon. De plus, dans le cadre d'un essai TSRSTS, la fissuration est transversale à l'axe principal de l'éprouvette comme c'est le cas dans la chaussée. Finalement, les résultats d'un essai TSRSTS permettent d'avoir une idée de la sensibilité thermique de l'enrobé en plus de nous fournir une approximation de la température de transition vitreuse (T_g).

À la lumière de ce qui vient d'être énoncé et puisque tous les auteurs s'entendent pour dire que l'essai TSRSTS est l'essai le mieux adapté pour évaluer les performances des enrobés à basse température, c'est ce type d'essai qui est sélectionné.

2.3 Les paramètres d'essais

Dans le cadre de ce programme expérimental, il convient de préciser les paramètres d'essais pour la mesure du module complexe et de la performance à basse température de l'enrobé par l'essai de retrait thermique empêché.

2.3.1 Le module complexe

Pour les essais de module complexe, les essais cycliques sinusoïdaux sont les essais qui sont les plus représentatifs et les plus simples à analyser. Par contre le niveau de déformation à utiliser pour rester dans le domaine linéaire du comportement viscoélastique de l'enrobé est inconnu en ce qui concerne les enrobés québécois.

Pour les enrobés français, le comportement viscoélastique de l'enrobé demeure linéaire tant et aussi longtemps que la déformation imposée demeure inférieure à 10^{-4} . Il est important de fixer cette limite de linéarité avant de faire les essais car la théorie démontrée se rapporte à un comportement viscoélastique linéaire.

Afin d'avoir la possibilité de connaître la rhéologie des enrobés sur une plage de fréquence assez grande, des courbes maîtresses doivent être bâties. Pour ce faire, les essais doivent être faits à plusieurs fréquences et plusieurs températures. Les courbes isochrones de ces essais doivent avoir, entre elles, des valeurs de norme du module complexe semblables afin de pouvoir utiliser la relation temps-température. Il est donc crucial de faire le bon choix des températures et des fréquences si on veut être en mesure de bâtir une courbe maîtresse.

Lors des essais de mesure du module complexe, une acquisition de données rapide permet de corriger les signaux réponse par la méthode des moindres carrés et ainsi

avoir accès à des valeurs réalistes des amplitudes maximales de la déformation et de la contrainte pour évaluer avec plus de justesse le module complexe. Sur la base de la revue de la documentation, l'acquisition d'une centaine de points par cycles sinusoïdaux est nécessaire.

2.3.2 L'essai de retrait thermique empêché

Lors de cet essai, les paramètres modifiables qui ont une influence sur le résultat de l'essai sont le taux de refroidissement et la dimension de l'éprouvette. Comme nous l'avons souligné au chapitre I, le taux de refroidissement influence surtout la contrainte de rupture.

L'essai TSRSTS est un essai normalisé et le taux de refroidissement est fixé à $10^{\circ}\text{C} / \text{h}$ pour minimiser la durée de l'essai même si le taux moyen réel de refroidissement au Canada est d'environ $1^{\circ}\text{C} / \text{h}$. Pour ce qui est des dimensions des éprouvettes, la norme prévoit des éprouvettes de $60 \pm 5 \text{ mm}$ de diamètre et $250 \pm 5 \text{ mm}$ de longueur. Nous avons convenu de respecter ces dimensions afin que les résultats de cette recherche soient comparables avec des résultats provenant d'autres recherches faites selon la norme.

2.4 Sélection des constituants pour la confection des enrobés bitumineux testés

Les critères de conception d'un enrobé bitumineux sont différents en fonction de l'usage auquel il est destiné. Un enrobé soumis aux charges d'un trafic lourd ne doit pas avoir les mêmes propriétés qu'un enrobé confectionné pour une piste cyclable; le coût de ces enrobés peut également être très différent. C'est particulièrement la performance des enrobés soumis aux conditions de sollicitation sévères (charges et températures), qui est préoccupante. Par conséquent, les enrobés bitumineux confectionnés pour mettre en œuvre la méthodologie d'essai et leur validation seront des enrobés couramment utilisés en couche de roulement pour des conditions de trafic sévère.

Selon les spécifications du MTQ à cet égard, nous avons décidé de confectionner des enrobés de type grenu, EG-10, dans le cadre de ce programme expérimental. Seuls les critères techniques de conception de l'enrobé ont été pris en compte dans le cadre de cette recherche sans tenir compte des coûts.

Par ailleurs, puisque les principaux objectifs de ce mémoire sont liés essentiellement à la caractérisation du module complexe et de la résistance à basse température des enrobés, et non à leur formulation, le seul critère de conception considéré dans la conception des enrobés est l'aptitude au compactage mesurée à l'aide de la presse à cisaillement giratoire (PCG).

2.4.1 L'enrobé et ses constituants

Les exigences relatives à la confection d'un enrobé EG-10 sont fournies par la norme 4202 du MTQ et résumées dans le tableau III.

2.4.1.1 Les granulats

Le choix des granulats est fortement tributaire de l'usage prévu. L'enrobé EG-10 est un enrobé utilisé en couche de surface. Selon les critères définis par le MTQ, les gros granulats doivent être de classe 1a et les granulats fins de classe 1. Il est à noter qu'il n'y a pas de normes exigeant une classe spécifique pour les granulats utilisés dans les enrobés bitumineux; par contre, il existe une norme qui spécifie la classe des granulats à utiliser dans les bétons de ciment utilisés dans une chaussée (MTQ 3101). La granulométrie et le nombre de classes granulométriques distinctes sont également bien définis dans la norme LC 4202 du MTQ.

Tableau III

**Caractéristiques des enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du
Laboratoire des chaussées**

Types d'enrobés	ESG-14	ESG-10	EQ-10	EGA-10	Méthodes d'essais
Usages	Couche unique ou couche de surface	Couche de surface	Couche de surface	Couche de surface	
Nombre minimal de classes granulaires distinctes à utiliser ^(*)	3	2	2	2	
Tamis	(% passant)				
28 mm					
20 mm	100				
14 mm	95-100	100	100	100	
10 mm	70-90	92-100	90-100	90-100	
5 mm	50-65	50-65	40-50	40-50	
* 2,5 mm	39,2	46,1	46,1	46,1	
* 1,25 mm	25,7-31,7	30,7-36,7	30,7-36,7	30,7-36,7	
* 630 µm	19,1-23,1	22,8-26,8	22,8-26,8	22,8-26,8	
* 315 µm	15,4	18,1	18,1	18,1	
160 µm	—	—	—	—	
80 µm	3,0-8,0	4,0-10,0	4,0-10,0	4,0-10,0	
Pourcentage de fibres (%) ^(**)				1,3	
Vibé (%)	11,6	12,2	12,4	14,6	
Vides à 10 girations (%)	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	≥ 11,0	LC 26-003
Vides à 80 girations (%)	—	4,0-7,0	4,0-7,0	4,0-7,0	LC 26-003
Vides à 100 girations (%)	4,0-7,0	—	—	—	LC 26-003
Vides à 200 girations (%) ^(**)	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	≥ 2,0	LC 26-003
Compacité (% min.)	92,0	92,0	92,0	92,0	LC 26-320
Résistance à l'orniérage sur plaques de 100 mm à 60 °C à 30 000 cycles (% max. de déformation) ^(***)	10	—	—	—	
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm à 60 °C					
à 1000 cycles	—	10	10	10	
à 3000 cycles (% max. de déformation) ^(***)	—	20	20	20	
Tenue à l'eau (% min.)	70	70	70	70	LC 26-001

(Source : Langlois et coll 2001)

2.4.1.2 Le filler

Comme pour les granulats, le filler doit répondre à des exigences particulières. Les exigences pour le filler sont donné dans la norme ASTM D 242-95 (*Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixtures*). Les exigences principales de cette norme sont décrites dans le tableau IV. Il est important de souligner qu'aucune exigence n'est spécifiée pour la fraction fine du filler, c'est-à-dire les particules passant le tamis de 75 μm .

Tableau IV

Caractéristiques requises du filler pour enrobés à chaud

Tamis	% passant massique
600 μm	100
300 μm	95-100
75 μm	70-100

(Source : ASTM D242-95)

2.4.1.3 Le bitume

Le choix du bitume est de première importance. Comme souligné dans le chapitre 1, le type et la teneur en bitume ont une grande influence sur la rhéologie et sur le comportement à basse température des enrobés bitumineux. La norme LC 4202 du MTQ fixe la teneur en bitume (V_{be}) des enrobés EG-10 (Tableau III). En ce qui concerne le type de bitume, il faut choisir entre un bitume standard et un bitume modifié avec des polymères. Étant donné que ce programme expérimental n'a pas pour but de vérifier l'effet du type de bitume sur le comportement de l'enrobé, mais bien de préciser une méthodologie d'essai pour la mesure du module complexe et de la résistance à basse température, un bitume standard sera utilisé.

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Introduction

Le chapitre I a permis de constater que bien des facteurs pouvaient modifier les résultats des essais de retrait thermique empêché et de module complexe. Dans la perspective d'évaluer convenablement l'influence de différents paramètres de constitution de l'enrobé sur son module complexe et sur sa résistance à basse température au TSRSTS, il est impératif de maîtriser les conditions d'essais. Certains des facteurs liés à la réalisation des essais doivent être bien cernés afin de les contrôler.

La revue de la documentation nous a permis de mettre en relief les principaux facteurs d'essais pour la mesure du module complexe et ceux pour l'essai de résistance à basse température à partir de l'essai de retrait thermique empêché. Le tableau V résume ces facteurs déterminants.

La revue de la documentation a permis d'apporter des précisions importantes relativement à chacun des facteurs présentés au tableau V. Néanmoins, compte tenu que certains facteurs sont dépendants du type d'enrobé bitumineux alors que d'autres sont plutôt liés spécifiquement à l'appareillage, un programme expérimental en vue de cerner les limites d'application des essais s'avère nécessaire.

Afin de cerner ces limites, différentes étapes ont été prévues selon une séquence bien définie tel que présentée à la figure 3.1.

Tableau V

**Facteurs d'essais ayant une influence sur les résultats des essais de module complexe
et de TSRSTS**

	Module complexe (E^*)	Résistance à basse température (TSRSTS)
Enceinte climatique	<ul style="list-style-type: none"> • L'homogénéité de la température • La différentielle de température entre l'enceinte et celle de l'éprouvette 	
Éprouvettes	<ul style="list-style-type: none"> • La préparation d'éprouvettes représentatives du terrain • La dimension des éprouvettes • La vitesse de chargement 	
Conditions d'essais	<ul style="list-style-type: none"> • La limite de linéarité du comportement VEL des enrobés bitumineux • La vitesse de chargement • L'application du concept temps-température • Exploitation des résultats expérimentaux par la méthode des moindres carrés 	<ul style="list-style-type: none"> • Le contrôle du taux de refroidissement
	<ul style="list-style-type: none"> • L'acquisition des données • La mise en place de l'éprouvette 	

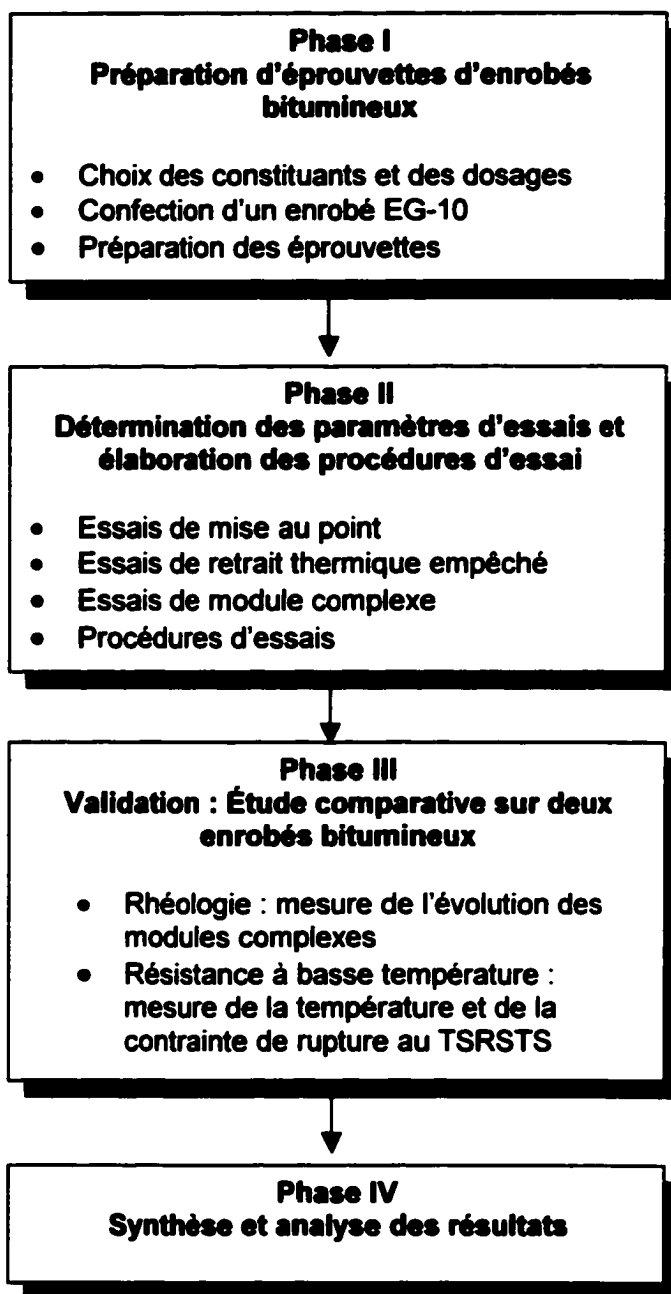


Figure 3.1 : Processus expérimental

3.2 Phase I

Cette première phase consiste à élaborer la méthodologie pour la mise en œuvre des éprouvettes représentatives des enrobés de chantier. Cette étape est très importante car il s'agit de la base de cette expérimentation. Avant de tester des enrobés, il faut savoir préparer des éprouvettes représentatives. Les étapes pour y arriver sont les suivantes :

1. la confection de l'enrobé;
2. la compaction des plaques;
3. le carottage des plaques;
4. la préparation des éprouvettes (sciage, surfacage, collage des casques, etc.).

L'aptitude au compactage des enrobés est la dernière étape de la conception d'un enrobé selon la méthode LC du MTQ. En s'assurant que la teneur en vide respecte les exigences du MTQ à la PCG, l'enrobé est, en principe, facile à mettre en place sur chantier.

3.3 Phase II

Cette deuxième phase consiste en la détermination des paramètres d'essais et en l'établissement de la méthodologie. Les facteurs indiqués au tableau V sont tous des facteurs déterminant sur les résultats de nos essais.

L'enrobé réagit différemment selon la grandeur et la vitesse d'application de la contrainte. Ces paramètres feront en sorte que l'enrobé aura un comportement viscoélastique linéaire ou non lors des essais de mesure du module complexe. De plus, la température à laquelle l'essai est effectué changera complètement la réponse de l'enrobé à la contrainte.

Afin de bien caractériser la rhéologie des enrobés, des essais couvrant une vaste plage de fréquence et de température sont nécessaires. Par contre, lors de ces essais, le comportement de l'enrobé doit demeurer dans le domaine linéaire.

Ensuite, pour être en mesure de bien déterminer les paramètres d'essais, la précision et les diverses limites de la presse et de la chambre climatique doivent être étudiées. Ces essais comprennent :

- 1. La précision de la température dans l'enceinte thermique;**
- 2. La précision des extensomètres;**
- 3. La précision de la cellule de charge et sa linéarité;**
- 4. L'ajustement des paramètres d'asservissement;**
- 5. La limite de linéarité du comportement viscoélastique des enrobés étudiés.**

Ces essais de mise au point sont essentiels et doivent être effectués au tout début de l'expérimentation.

Pour ce qui est des essais de résistance à la fissuration thermique, il existe une norme (AASHTO TP10-93) que nous allons appliquer.

Un des points importants de cette phase est l'établissement d'une méthodologie. C'est cette méthodologie qui dictera l'ordre dans lequel les essais doivent être effectués. Il est clair que les essais de mise au point sont les premiers essais à être fait. Une fois ces essais terminés, les essais TSRSTS sur l'ensemble des mélanges sont effectués avant de procéder aux essais de mesure du module complexe.

Pour les deux types d'essais, il faut, suite aux essais de mise au point, préparer les éprouvettes. Après l'installation d'une éprouvette dans la presse, il faut prévoir un conditionnement en température d'une durée prédéterminée et sous une contrainte contrôlée. Une fois le conditionnement terminé, l'essai peut débuter. Ensuite, il ne reste qu'à analyser les résultats.

3.4 Phase III

Après avoir bien établi la méthodologie d'essai pour la mesure du module complexe et de la résistance à basse température, nous complétons le programme expérimental par une étude comparative de ces paramètres sur deux enrobés bitumineux distincts.

Dans le chapitre I, nous avons souligné que diverses études sur les enrobés bitumineux ont été conduites pour évaluer l'influence du filler dans les enrobés. Nous avons choisi de varier la teneur en filler dans les enrobés et d'évaluer leurs performances respectives vis-à-vis de E^* et de la résistance à basse température (TSRSTS). C'est le seul facteur constitutif des enrobés qui est étudié dans ce projet.

Afin d'avoir une plus grande précision, trois éprouvettes de ϕ 60mm par 250mm de longueur sont testées en retrait thermique empêché (TSRSTS) et trois éprouvettes de ϕ 80mm par 250mm de longueur sont testées en module complexe pour chacun des enrobés.

3.5 Phase IV

La phase IV du projet consiste essentiellement à vérifier la validité des résultats obtenus. Une synthèse et l'analyse des résultats des deux essais permettra de comparer nos résultats entre eux et de les comparer avec des résultats de la revue de la documentation.

CHAPITRE 4

DESCRIPTIONS DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ENROBÉS ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE

4.1 Introduction

Les matériaux utilisés pour ce programme expérimental de même que les essais effectués sont décrits en détail dans ce chapitre. Dans un premier temps, les matériaux utilisés et les exigences relatives aux normes sont présentés et, dans un deuxième temps, une description complète des essais est donnée.

4.2 Les matériaux utilisés

Pour la confection des enrobés EG-10, nous avons utilisé : un gros granulat, un granulat fin, un sable naturel, un filler et un bitume. Les caractéristiques de chacun de ces matériaux sont revues en détails aux sections suivantes.

4.2.1 Les granulats

Les granulats utilisés dans la confection des enrobés proviennent de la carrière Raycar de St-Flavien (Québec). Le gros granulat est un basalte concassées de couleur grise avec quelques particules blanches. Trois calibres de pierres ont été utilisés : 0-2,5 mm, 2,5-5 mm et 5-10 mm. Les caractéristiques physiques de ces granulats sont présentées dans le tableau VI. Les classes granulaires sont conformes aux exigences du MTQ (norme 4202).

Pour faciliter la mise en place d'un enrobé grenu constitué à 100% de particules concassées, il est usuel de substituer une fraction de la partie fine par un sable naturel à béton, constitué de particules arrondies. Ce sable naturel est un sable de silice provenant de Ste-Émilie-de-l'énergie. Il a été tamisé une première fois pour enlever les particules grossières afin d'avoir une classe 0-5 mm. Les caractéristiques physiques

de chacun des granulats utilisés dans la confection des enrobés sont également données dans le tableau VI.

Tableau VI

Caractéristiques des granulats utilisés

Caractéristiques	Normes	Résultats			
		0-2.5	2.5-5	5-10	Sable naturel
Catégorie	LC 2101 (MTQ)	1	1	1-a	1
Densité relative brute	NQ 2560-065 et 067	2,655	2,750	2,824	2,653
Absorption en eau (%)	NQ 2560-065 et 067	3,83	1,97	1,52	1,48
Friabilité (%)	NQ 2560-080	18,6	14,9	-	15,0
Fragmentation (%)	LC 21-100	-	-	100	-
Coefficient d'écoulement	NQ 2560-075	128	-	-	78
Résistance à la fragm. Los-Angeles (%)	LC 21-400	-	-	11,6	-
Résist. À l'usure Micro-Deval (%)	NQ 2560-070 LC 21-101	10,0	3,5	7,0	7,6
Granulométrie	Tamis (mm)	(% passant)			
	14	100	100	100	100
	10	100	100	98	100
	5	100	100	6,2	100
	2,5	94	8,8	1,2	89
	1,25	60	1,4	1,0	78
	0,630	38	0,9	0,9	58
	0,315	25	0,7	0,9	26
	0,160	16	0,6	0,8	5,2
	0,080	10	0,4	0,7	0,8

4.2.1.1 La granulométrie

Les granulats ont été combinés de manière à satisfaire aux exigences granulométriques de la norme 4202 du MTQ pour un enrobé EG-10 (tableau II). Les courbes granulométriques des deux mélanges granulaires confectionnés sont montrées à la figure 4.1. Sur cette figure, la courbe de masse volumique maximale est également présentée. La courbe de masse volumique maximale représente la granulométrie avec le minimum de vide intergranulaire.

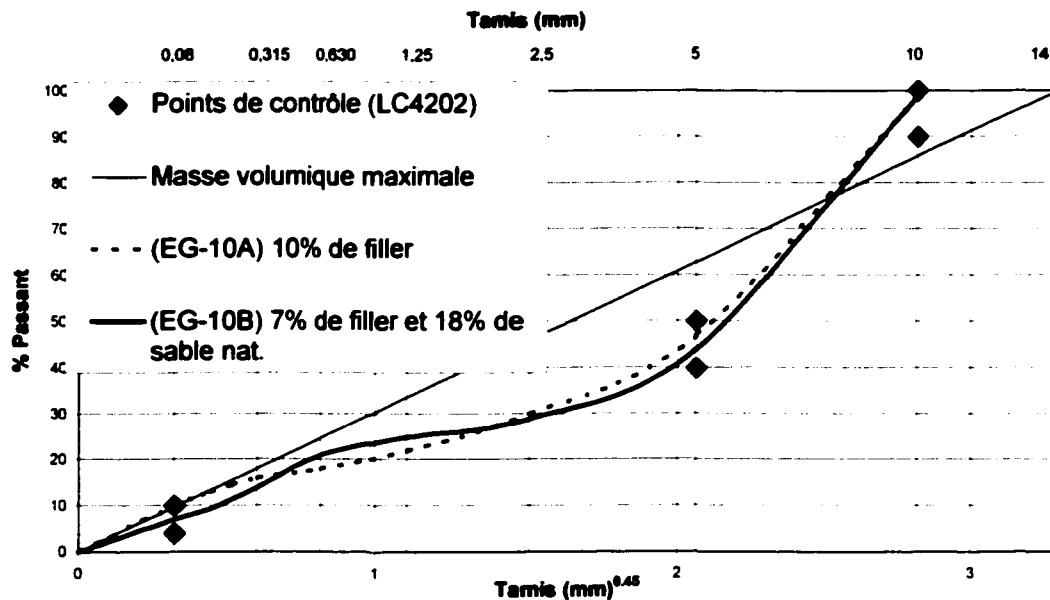


Figure 4.1 : Courbes granulométriques des deux enrobés bitumineux étudiés dans le programme expérimental

4.2.2 Le filler

Les caractéristiques physiques du filler employé dans le cadre de l'expérimentation sont données au tableau VII. La densité inscrite dans le tableau VII nous a été donnée par le fournisseur. La granulométrie du filler a été obtenue par sédimentation (voir annexe 2). La méthode employée s'inspire des normes ASTM D422 et NQ 2501-025.

Il est important de noter que la norme 4202 du MTQ précise une exigence quant au pourcentage passant à 80 μm , mais aucune exigence quant à sa granulométrie.

Tableau VII

Caractéristiques du filler utilisé

CARACTÉRISTIQUES		RÉSULTATS
Nom		calcaire
Apparence		farine
Densité		2,700
Granulométrie	Tamis (μm)	% passant
	630	100
	315	100
	160	91
	80	76
	59	61
	42	60
	28	59
	20	55
	15	49
	11	42
	8	34
	6	25
	4	20
	3	15

La granulométrie de ce filler est également présentée à la figure 4.2. Le filler répond aux exigences du MTQ (entre 70% et 100% passant au tamis 80 μm).

4.2.3 Le bitume

Un bitume standard, sans ajout de polymère, a été utilisé pour la confection des enrobés bitumineux. Il provient de la raffinerie de Montréal-Est de Shell Canada. Une attention particulière a été prise afin d'utiliser du bitume provenant d'un même réservoir.

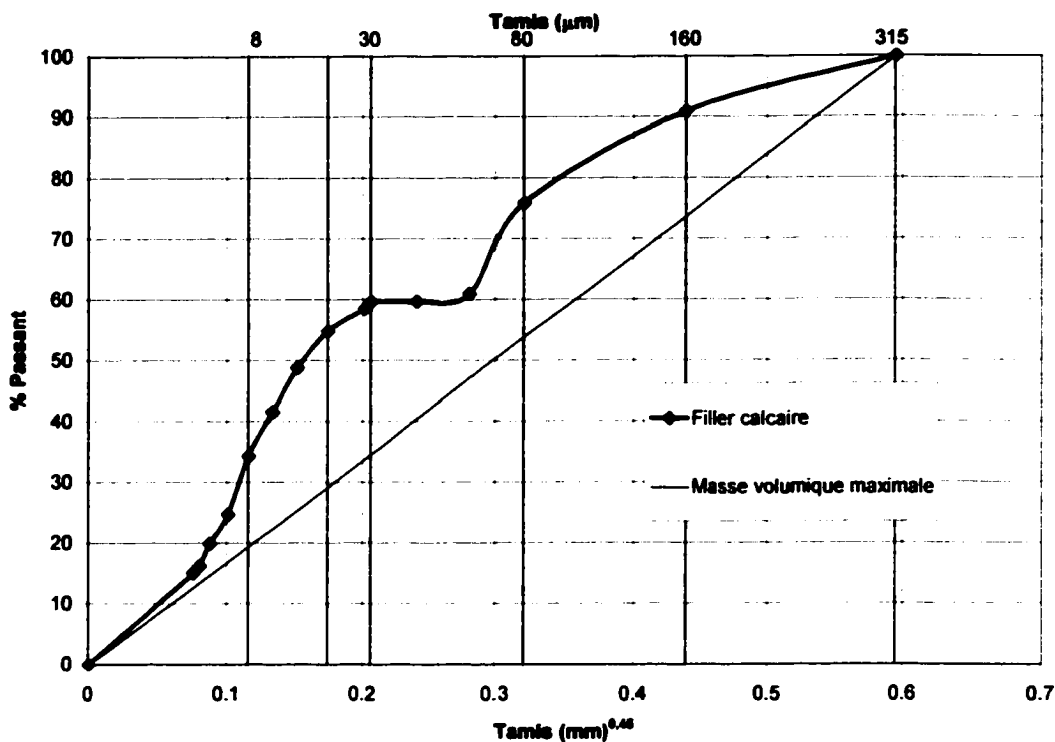


Figure 4.2 : Courbe granulométrique du filler calcaire utilisé

Le bitume utilisé est un PG 58-28. Ce bitume n'est pas celui recommandé par le MTQ pour la confection d'un EG-10 car le MTQ préconise des bitumes modifiés pour des chaussées supportant un fort trafic. Un bitume pur a été utilisé afin de limiter les coûts. Les caractéristiques du bitume sont données au tableau VIII. Ces caractéristiques nous ont été données par le fournisseur.

4.3 La formulation

Les deux enrobés confectionnés lors de la phase I du programme expérimental ont été établis en se basant sur les exigences du MTQ pour la confection d'un enrobé EG-10 (enrobé grenu). Un premier enrobé (EG-10A) a été confectionné en utilisant seulement des granulats concassés. Du sable naturel a été ajouté dans le deuxième enrobé (EG-10B) afin de pouvoir diminuer la quantité de filler tout en gardant une maniabilité,

mesurée à la PCG, similaire. Les caractéristiques de ces deux enrobés sont montrées au tableau IX.

Tableau VIII

Caractéristiques du bitume utilisé

CARACTÉRISTIQUES		RÉSULTATS
Fabricant		Produits Shell Canada
Classe du bitume		PG58-28
No. du lot		104
Point éclair (°C)		338,5
Solubilité (%) à 25°C		99,91
Perte en masse au RTFOT (%)		0,023
Masse volumique (g/cm ³) à 25°C		1,0079
Viscosité Brookfield (mPa.s)	131°C	375
	161°C	107
Température élevé de caract., T _e (°C)		59,5
Température basse de caract., T _b (°C)		-29,7

Tableau IX

Caractéristiques des deux enrobés EG-10 confectionnés lors de la phase I du programme expérimental

Caractéristiques	Enrobé	
	EG-10A	EG-10B
% de filler	10	7
Vbe (%)	12,4	12,4

Dmm	2,571	2,571
% sable naturel	0	18
Dmb'	2,430	2,399
Aptitude au compactage (VI %)		
Nombre de girations	Teneur en vides	
10	16,0%	14,0%
80	6,7%	5,5%
200	4,0%	2,9%

évalué à 80 girations

4.4 Les essais de laboratoire

Cette section décrit les essais effectués en laboratoire dans le cadre du programme expérimental. Dans un premier temps, il est question de la préparation des éprouvettes. Dans un deuxième temps, il est question des essais effectués pour analyser la rhéologie des enrobés, et dans un troisième temps, il est question des essais nécessaires à la mise au point d'un essai de module complexe et de retrait thermique empêché.

4.4.1 La confection et la préparation des éprouvettes

Les enrobés ont été formulés selon la méthode LC 26-004 du MTQ : *Formulation des enrobés à l'aide de la presse à cisaillement giratoire selon la méthode du laboratoire des chaussées*. Une fois les enrobés conformes à la PCG, des plaques d'enrobé ont été compactées avant d'être carottées puis testées en retrait thermique empêché et en module complexe.

4.4.1.1 La confection des enrobés

Chacune des composantes de l'enrobé a été chauffée dans des étuves ventilées à une température précise avant d'être malaxées ensemble. C'est la classe du bitume, le PG, qui dicte les différentes températures. Pour le bitume PG 58-28 que nous avons utilisé, le malaxage se fait lorsque le bitume est à $148 \pm 2^\circ\text{C}$ et les granulats à 15°C de plus

soit à $163 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Une fois bien malaxé, l'enrobé est amené à la température de compactage à $137 \pm 2^{\circ}\text{C}$. C'est à cette température que l'enrobé va subir une cure en étuve d'une durée égale à celle utilisée lors de l'essai à la PCG, soit 30 minutes. Lors des séquences d'entreposage des enrobés dans l'étuve, aucune précaution n'a été prise afin de limiter le contact de l'enrobé avec l'air.

Étant donné que la quantité d'enrobé nécessaire à la confection d'une plaque d'enrobé (≈ 85 kg) est plus grande que la capacité du malaxeur (≈ 50 kg), l'enrobé est malaxé en deux étapes. Les granulats et le bitume de chacune des gâchées sont pesés séparément. Ce n'est qu'une fois le malaxage et la cure terminés que les deux enrobés sont mélangés ensemble manuellement pour être compactés.

Il est à noter que le bol du malaxeur n'est pas chauffé ce qui entraîne une baisse de température durant le malaxage. Par contre, en travaillant rapidement, nous avons limité les pertes de chaleur et donc réduit le temps nécessaire de réchauffage pour atteindre la température de compactage.

4.4.1.2 Le compactage des plaques d'enrobés bitumineux

Les éprouvettes utilisées pour effectuer les essais de retrait thermique empêché et de module complexe ont été carottées dans les plaques fabriquées en laboratoire à l'aide d'un compacteur de plaques.

Le compacteur de plaques permet la fabrication en laboratoire de plaques d'enrobé ayant des caractéristiques semblables aux enrobés mis en œuvre sur chantier. Le compactage d'un enrobé sur chantier avec un rouleau compacteur a pour effet de forcer les granulats à prendre une orientation particulière créant ainsi un matériau avec une structure fortement anisotrope. Les propriétés rhéologiques d'un enrobé évaluées sur les carottes prélevées perpendiculairement à l'action du compacteur peuvent différer de 20% par rapport aux propriétés mesurées sur des carottes prélevées parallèlement à l'action du compacteur (Di Benedetto et de la Roche 1998).

Dans le cadre de ce programme expérimental, un compacteur de plaques du laboratoire des Ponts et Chaussées a été utilisé. Une compaction de 95% a été visée pour chacune des plaques compactées. Afin de pouvoir carotter des éprouvettes de 80 mm de diamètre, des plaques de 125 mm d'épaisseur ont été compactées. L'utilisation de plaques plus épaisses aurait été justifiée à cause de l'hétérogénéité de l'enrobé compacté associée à la perte de rendement du compactage avec la profondeur. La dimension des plaques confectionnées est de 125 x 390 x 580 mm. Le compacteur utilisé est présenté à la figure 4.3.



Figure 4.3 : Compacteur de plaque LPC

Pour faire le compactage, une séquence de passe est décrite dans la norme préliminaire du MTQ LC 26-400 qui s'inspire de la norme française NF P 98-250-2 partie 2 : compactage. Après le compactage, la plaque d'enrobé est gardée 48 heures

dans le moule d'acier avant le démoulage. La préparation des éprouvettes est expliquée en détails à l'annexe 3.

4.4.1.3 Le carottage des éprouvettes

Après compactage, les plaques sont sciées en deux perpendiculairement à l'axe d'action du compacteur, puis carottées dans l'épaisseur à partir des faces sciées (figure 4.4). Le choix du sens de carottage permet de mesurer les propriétés rhéologiques de l'enrobé selon la direction du champ de contrainte rencontrée dans une chaussée. Trois éprouvettes de 80 mm de diamètre et six de 60 mm de diamètre ont été carottées dans chacune des plaques.

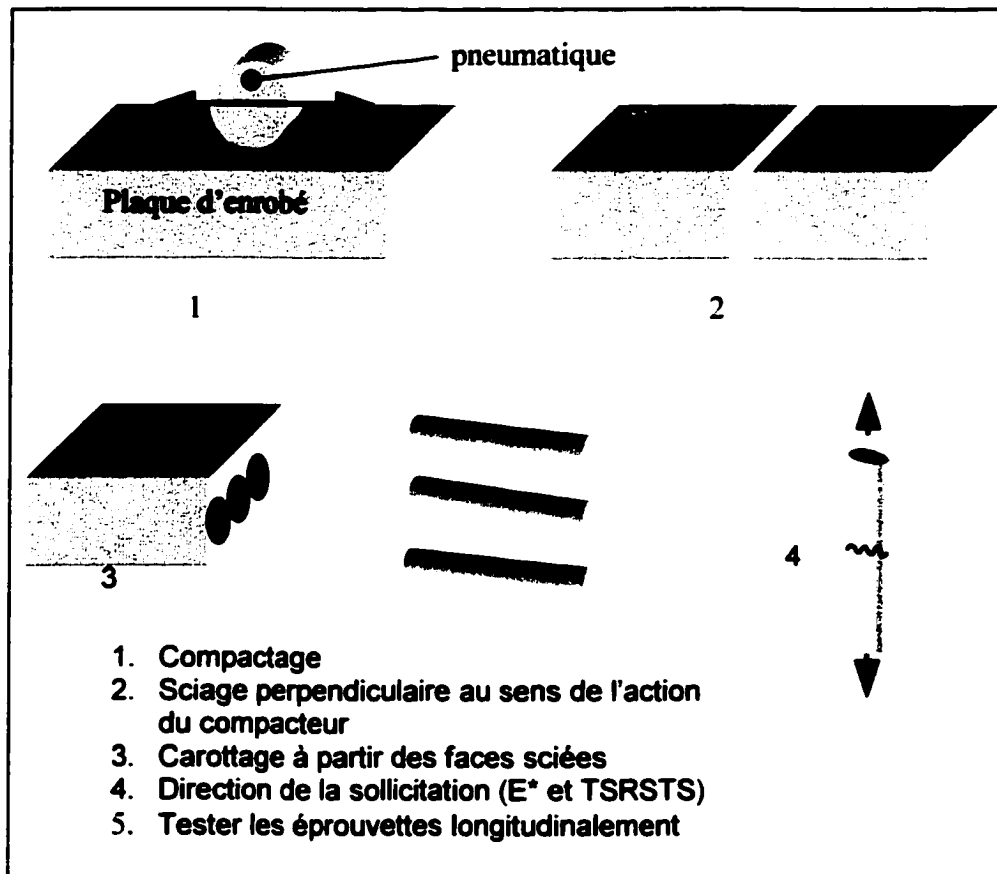


Figure 4.4: Étapes liées à la préparation d'une éprouvette pour les essais de retrait empêché ou de module complexe.

Les éprouvettes sont ensuite coupées à 250 mm de longueur puis surfacées pour s'assurer que les deux extrémités soient bien parallèles. Finalement, les éprouvettes sont entreposées couchées sur le côté dans un bac de sable afin de limiter le fluage jusqu'au jour de l'essai.

4.4.1.4 Le collage des casques

Pour effectuer les essais de retrait thermique empêché et de module complexe (contraintes alternées autour de zéro), des casques en aluminium sont collés sur les deux bouts de l'éprouvette. Les casques ont un diamètre de 152 mm et une épaisseur de 51 mm. Un époxy à prise lente a été utilisé (Sikadur 31 Hi-mod Gel), car une colle à prise rapide produit beaucoup de chaleur et peut induire des désordres à l'interface du

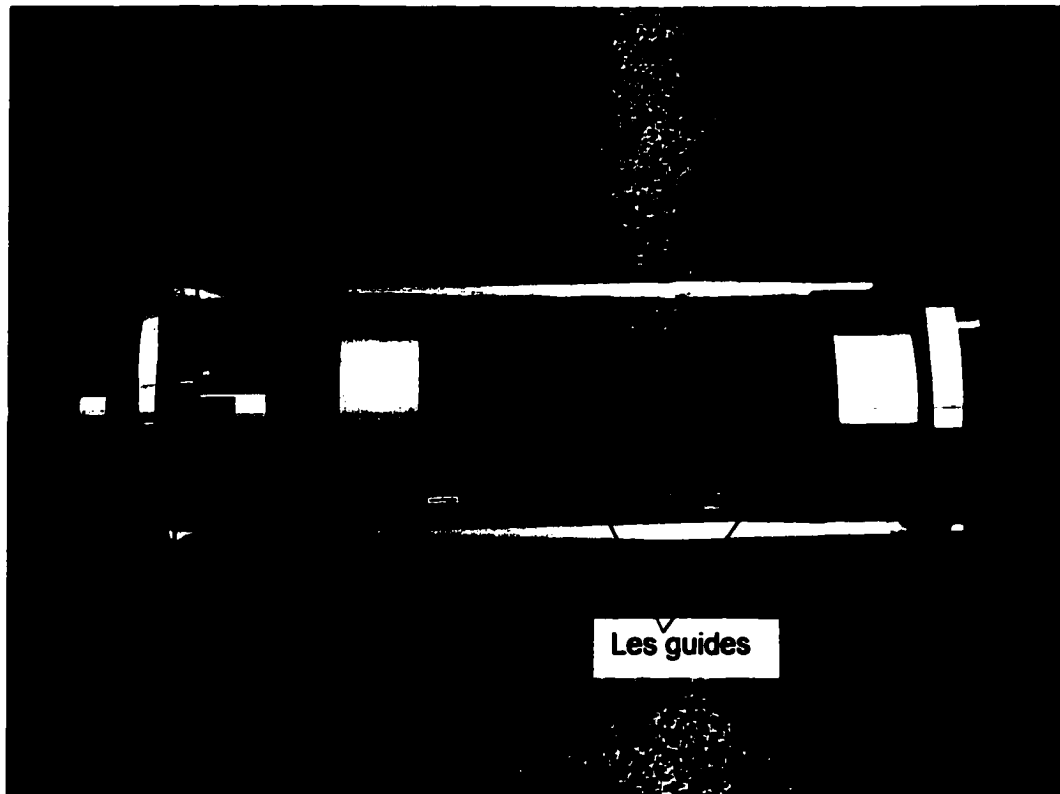


Figure 4.5 : Photo du banc de collage utilisé pour coller les casques d'aluminium aux extrémités des éprouvettes

plan de collage. Lors des essais, les contraintes induites dans l'éprouvette sont perpendiculaires à l'axe longitudinal. Par conséquent, si les casques ne sont pas parfaitement parallèles et centrés, une contrainte de torsion et/ou de flexion pourrait être induite au sein de l'éprouvette et ainsi fausser les résultats. Afin de pallier à ce problème, les casques sont collés à l'aide d'un banc de collage (figure 4.5). Les guides du banc de collage doivent toujours être bien serrés car un mouvement de ces derniers peut entraîner le décentrage de l'éprouvette.

4.4.2 L'essai de retrait thermique empêché : TSRSTS

L'essai de retrait thermique empêché effectué dans le cadre de ce programme expérimental a été réalisé en grande partie selon la norme AASHTO TP10-93 *Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength*.

Afin de pouvoir effectuer cet essai, une presse avec laquelle il est possible de contrôler précisément le déplacement, la déformation et la force doit être utilisée. Une enceinte thermique à taux de refroidissement contrôlable et des extensomètres sont également nécessaires.

Comme nous l'avons vu au chapitre I, l'essai de TSRSTS consiste essentiellement à empêcher la déformation d'une éprouvette soumise à un taux de refroidissement constant. Pour ce faire, il faut être en mesure, d'une part, de mesurer la déformation dans l'éprouvette en cours de refroidissement de manière à toujours la maintenir à zéro, et d'autre part, il faut un système mécanique, asservi en temps réel sur la base de la mesure de la déformation de l'éprouvette, capable de développer une force qui s'oppose au mouvement thermique de l'éprouvette. Les deux composantes de ce système sont 1) trois extensomètres pour mesurer les déformations dans l'éprouvette (disposés à 120° l'un de l'autre) et 2) une presse hydraulique munie d'une enceinte thermique.

4.4.2.1 La presse

Le vérin hydraulique de la presse est situé dans la partie supérieure du bâti de la presse tandis que la cellule de charge est située dans la partie basse sur un plateau fixe. L'asservissement de la presse peut être réglé en force grâce à la cellule de charge, en déplacement en se basant sur le déplacement du vérin hydraulique ou bien en déformation en se référant sur la moyenne des déformations des trois extensomètres. La marche à suivre pour contrôler la presse se trouve à l'annexe 4.

4.4.2.2 L'enceinte thermique

L'enceinte thermique est refroidie à l'aide d'azote liquide (figure 4.6). Dans la bonbonne, la pression est de 151 kPa, soit 1,5 atm. Un système de ventilation situé à

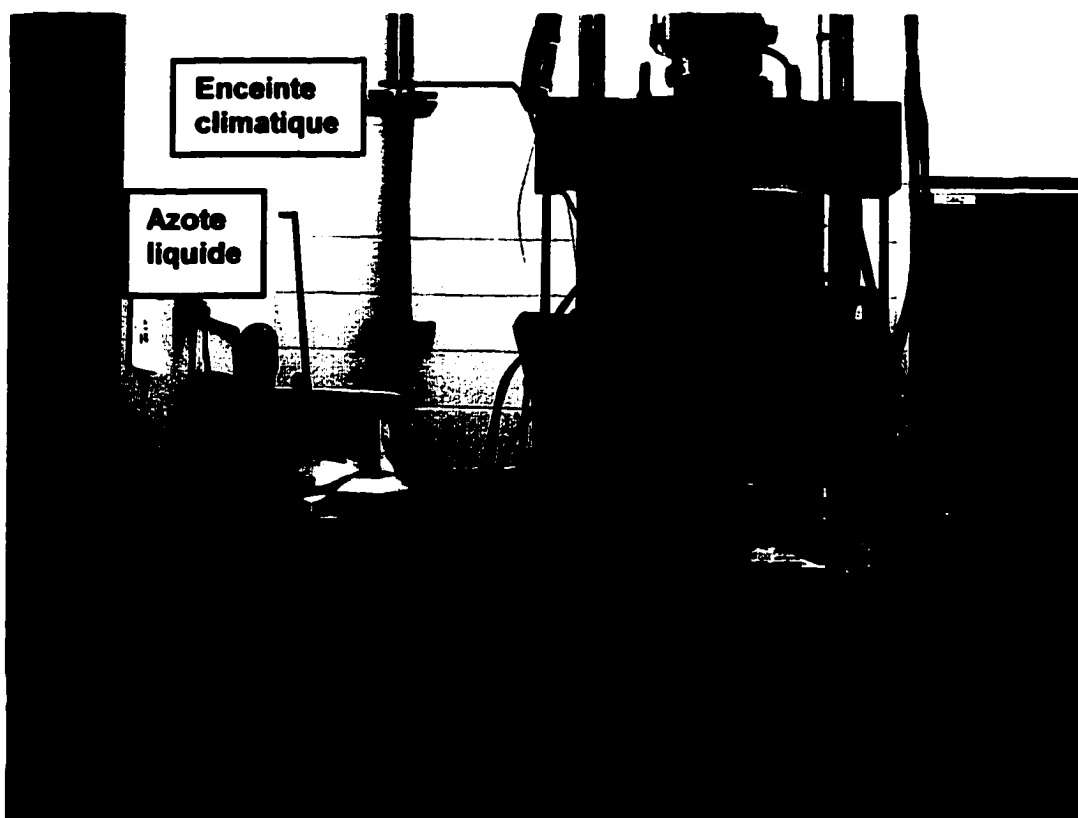


Figure 4.6 : Vue d'ensemble de la presse et de l'enceinte thermique utilisées pour les essais de retrait thermique empêché

l'arrière de l'enceinte permet une circulation de l'air et ainsi une meilleure homogénéité de la température dans l'enceinte (figure 4.7). Le taux de refroidissement contrôlé par ordinateur est obtenu en se référant au thermocouple de type k de l'enceinte placé juste devant le système de ventilation et non en se référant aux thermocouples placés sur l'éprouvette. Le thermocouple de type k a une précision de $1,1^{\circ}\text{C}$ (Omega 1998).

Lors du positionnement de l'éprouvette dans l'enceinte climatique, une attention particulière a été portée afin que les extensomètres soient toujours placés de la même façon par rapport au fond de la chambre, d'un essai à l'autre. Aucun des extensomètres n'a été placé directement entre l'échantillon et la bouche de ventilation (figure 4.7). Les extensomètres 1 et 3 sont placés plus près de la source de ventilation tandis que l'extensomètre 2 se situe devant l'échantillon.

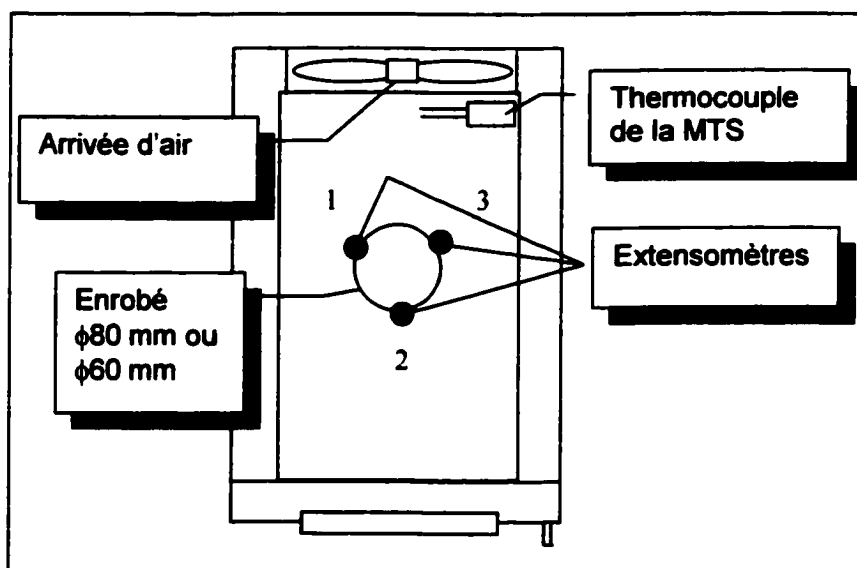


Figure 4.7 : Schéma en plan de l'enceinte climatique avec le positionnement des extensomètres

4.4.2.3 Les extensomètres

Pour détecter la variation de longueur en cours d'essai, trois extensomètres sont placés à la surface de l'éprouvette avec un espacement constant de 120° . La figure 4.8 montre le couplage d'un extensomètre contre la paroi d'une éprouvette. Chacun des

extensomètres a une longueur totale de 165 mm et est constitué d'une tige en Invar (115 mm), un alliage composé de 65% de nickel et de 35% d'acier (White 1999). Le coefficient de dilatation thermique de l'invar (α) est faible, compris entre 0.7 et 1.6×10^{-6} mm/mm°C (Callister 2000). En ayant un coefficient de dilatation faible mais non nul, la tige en invar limite les chances de glissement au contact extensomètre-éprouvette

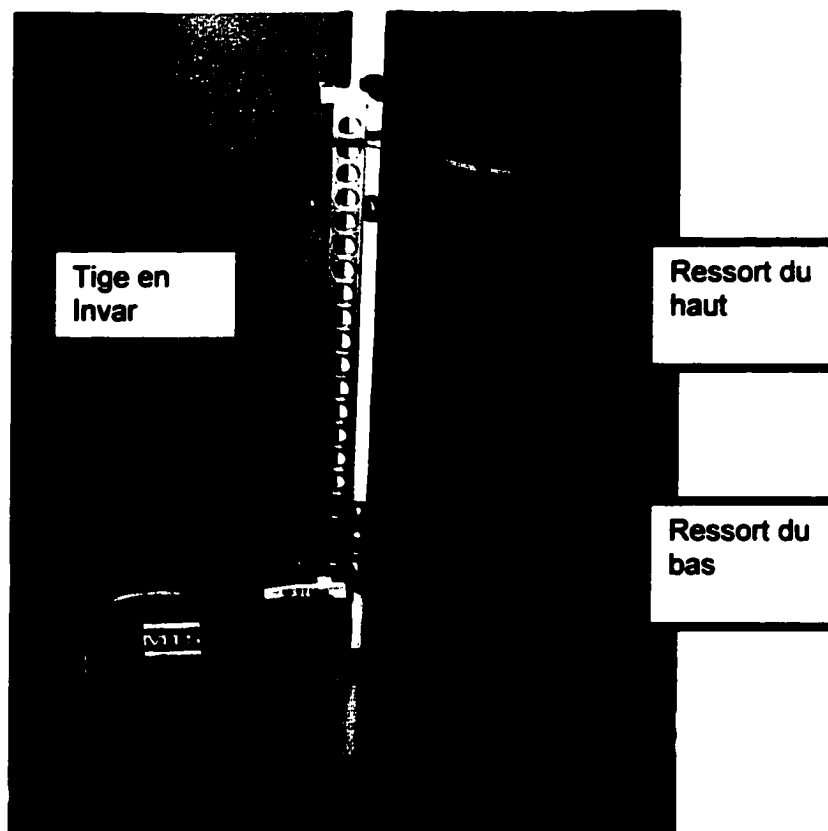


Figure 4.8 : Un extensomètre attaché sur une éprouvette d'enrobé bitumineux

puisque'en retrait thermique empêché, on empêche la déformation longitudinale au bout de l'éprouvette en cours de refroidissement. Il est nécessaire d'étalonner les extensomètres avant de s'en servir comme instrument de référence. Ce point est traité à la section 4.5, aspects métrologiques.

La pose des extensomètres - Pour positionner à 120° les extensomètres sur l'éprouvette, il faut d'abord indiquer leur emplacement sur l'éprouvette à l'aide d'un

gabarit en papier. Il suffit d'avoir une bande de papier dont la longueur est égale au diamètre de l'éprouvette puis d'y tracer trois lignes verticales qui permettront de placer les trois extensomètres parfaitement droits. Le gabarit est ensuite enroulé autour de l'éprouvette et les trois lignes verticales reportées sur l'échantillon.

Les extensomètres ne sont pas collés contre la paroi de l'éprouvette. Ils sont maintenus en place à l'aide de ressorts placés aux deux extrémités des extensomètres, ce qui suffit à les maintenir en place en étant attachés les uns aux autres (figure 4.8). Les ressorts exercent ainsi un confinement qui solidarise les points de contact des extensomètres à l'éprouvette. Il est important que les ressorts utilisés (six en tout) soient dans le même état, sinon les ressorts avec la plus grande force déplaceront l'un ou l'autre des extensomètres.

Pour faciliter le montage des extensomètres, on utilise des bandes élastiques. En effet, une fois les guides tracés sur l'éprouvette, les extensomètres sont attachés autour à l'aide de bandes élastiques. Les élastiques vont permettre de garder les extensomètres en place pendant la pose des ressorts.

4.4.2.4 La cellule de charge

Comme mentionné précédemment, la cellule de charge est située dans la partie inférieure du bâti de la presse. La cellule a une capacité de 100 kN. La mise à zéro de la cellule est effectuée lorsqu'il n'y a pas d'éprouvette dans la presse, mais le système d'attache est présent. Ceci implique qu'avant même le début de l'essai, la cellule lit une contrainte induite par la masse de l'éprouvette et des casques en aluminium.

4.4.2.5 Montage de l'éprouvette dans l'enceinte et déroulement de l'essai de retrait thermique empêché

Avant de commencer l'essai proprement dit, c'est-à-dire soumettre l'éprouvette à un taux de refroidissement donnée en condition de retrait empêché, l'éprouvette d'enrobé

est placée dans l'enceinte thermique pour une période de conditionnement de quatre heures à 5°C. Nous avons opté pour un conditionnement de quatre heures plutôt que de six heures comme préconisé dans la AASHTO TP10-93. Après vérification, nous avons constaté que la température à la surface de l'éprouvette est stable après quatre

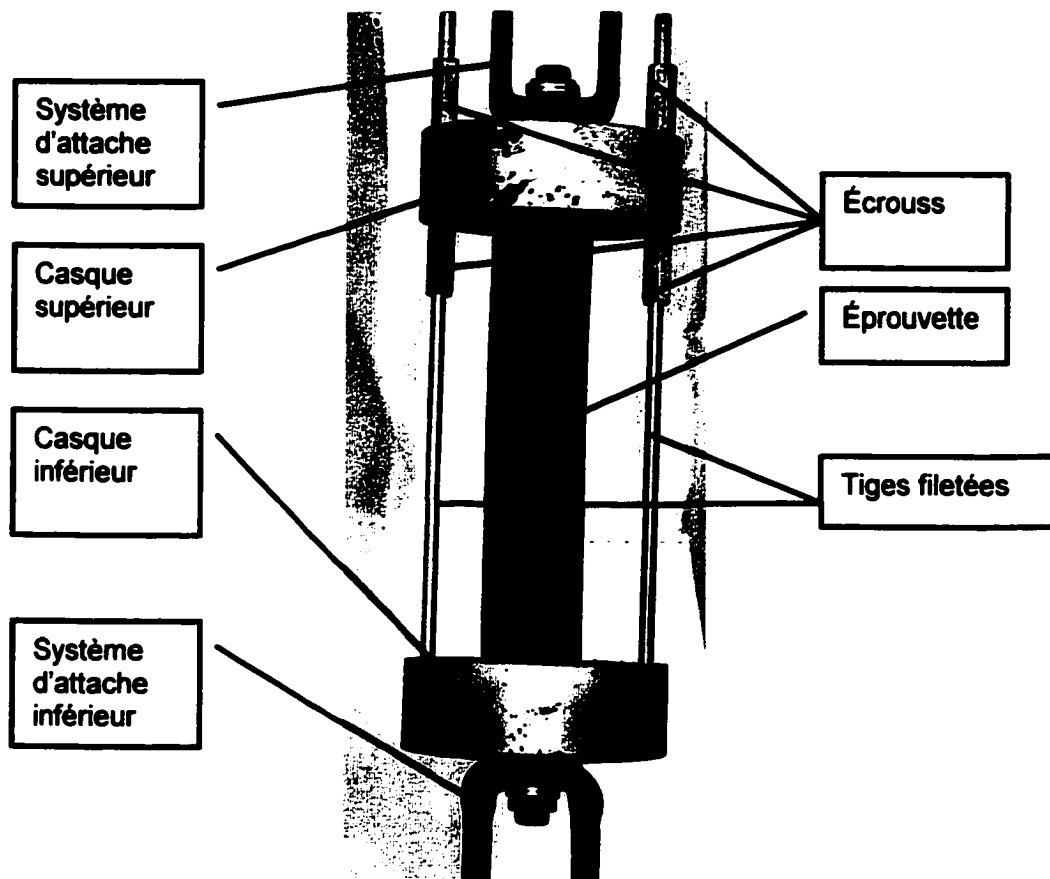


Figure 4.9 : Montage de l'éprouvette dans l'enceinte thermique

heures. Pour empêcher le fluage de l'éprouvette en cours de conditionnement, des tiges filetées de 9,5 mm de diamètre solidarisent les deux casques limitant ainsi l'allongement tout en permettant la contraction thermique de l'enrobé de se faire. Les tiges sont vissées dans le casque inférieur et des écrous de part et d'autre du casque supérieur permettent de fixer la position de ce dernier (figure 4.9).

Une fois les deux casques solidarisés, l'éprouvette est boulonnée par son casque supérieur à la presse. Le vérin de la presse doit être élevé de manière à ce que

l'éprouvette ne soit pas en contact avec le système d'attache inférieur de la presse. Avant de refermer la porte de l'enceinte, les écrous situés sous le casque supérieur doivent être dévissés tandis que ceux situés au-dessus du casque doivent demeurer en place. Lors de cette opération, l'asservissement de la presse doit être en mode déplacement. Rappelons que la période de conditionnement permet de s'assurer de l'homogénéité de la température au sein de l'éprouvette de manière à éviter, du moins au départ de l'essai, un différentiel de température pouvant générer des contraintes internes indésirables.

Après la période de conditionnement, l'éprouvette est abaissée jusqu'au système d'attache inférieur de la presse. Cette opération se fait en mode de déplacement. L'approche finale et le contact entre l'éprouvette et le système d'attache inférieur de la presse se fait en contrôle de force afin d'éviter d'induire des contraintes dans l'éprouvette. Une force négative est imposée, et équivalente à la masse de l'éprouvette, des extensomètres, des tiges et écrous et du casque inférieur. Une fois le contact établi, le casque inférieur est solidement fixé au système d'attache de la presse. Il est ensuite important de dévisser les écrous situés au-dessus du casque supérieur et d'enlever les goupilles de sécurité des extensomètres. L'essai peut ensuite débuter. La température dans l'enceinte est abaissée à un taux de 10°C / heure, tout en maintenant la longueur de l'échantillon constante, jusqu'à rupture de l'éprouvette. Durant cette phase de l'essai, l'asservissement de la presse est en mode de déformation avec pour consigne de maintenir la déformation moyenne des trois extensomètres à zéro.

4.4.3 La mesure des propriétés rhéologiques des enrobés : la mesure du module complexe

Comme nous l'avons mentionné au chapitre I, l'essai de mesure du module complexe consiste à imposer une déformation longitudinale sinusoïdale en contrainte alternée (tension-compression) à une éprouvette d'enrobé, et ce à des températures et des fréquences données. Les températures et les fréquences sélectionnées doivent permettre d'établir des courbes maîtresses du comportement rhéologique des enrobés.

Afin de pouvoir réaliser cet essai, il faut être capable de mesurer la déformation en cours d'essai de manière à pouvoir imposer une déformation sinusoïdale. Pour ce faire, des extensomètres attachés à 120° l'un de l'autre à la surface de l'éprouvette testée et un système mécanique asservi en temps réel capable d'imposer la force nécessaire afin d'atteindre la déformation voulue sont nécessaires. Finalement, en plus d'une enceinte thermique qui permet d'avoir une température constante et homogène en cours d'essai, un système d'acquisition de données est nécessaire.

4.4.3.1 Les extensomètres

Le même appareillage est utilisé pour la mesure du module complexe que pour l'essai de retrait thermique empêché à la différence de la longueur des tiges des extensomètres. Pour les essais de module complexe, des tiges plus courtes (50 mm) en aluminium et en acier sont utilisées de façon à avoir des extensomètres d'une longueur totale de 100 mm. Encore une fois, il est nécessaire d'étalonner les extensomètres avant de s'en servir comme instrument de référence. Ce point sera traité en détails à la section 4.5, aspects métrologiques.

4.4.3.2 La cellule de charge

La cellule de charge d'une capacité de 100 kN est réglée à 10 kN pour les essais de mesure du module complexe. Étant donné que les forces mesurées par la cellule de charge sont inférieures à 10 kN lors de ces essais, il est possible d'atteindre une plus grande précision en réglant la cellule à 10 kN.

4.4.3.3 Déroulement d'un essai

Pour chaque palier de températures auquel l'essai de module complexe est effectué, il faut prévoir une période de conditionnement en température de l'éprouvette tout comme pour l'essai de retrait thermique empêché.

Comme pour l'essai de TSRSTS, une fois le conditionnement en température terminé, l'éprouvette est fixée au système d'attache inférieur et le serrage est effectué en

asservissement en force. Afin d'avoir une charge nulle sur l'éprouvette, une force négative est imposée, $-0,06$ kN, et équivalente à la masse de l'éprouvette, des deux tiges filetées et des écrous, des trois extensomètres et du casque inférieur. Il faut comprendre que la cellule de charge est située sous l'éprouvette et qu'appliquer une force de $-0,06$ kN équivaut à soustraire de la cellule de charge tout le montage dessus à l'exception du casque supérieur.

La même éprouvette est testée aux cinq températures et aux huit fréquences indiquées au tableau X. Afin de ne pas abîmer l'éprouvette (essai non-destructif), les essais se font de la plus basse température vers les plus hautes. Pour la même raison, à une température donnée, la série d'essais commence par la fréquence la plus rapide jusqu'à la plus basse.

4.4.3.3.1 Les fréquences et les températures d'essai

Dans la perspective d'élaborer une courbe maîtresse, plusieurs températures et fréquences d'essais ont été choisies (tableau X). Des contraintes techniques de réalisation empêchent l'utilisation des mêmes fréquences à toutes les températures.

Tableau X

Fréquences et températures utilisées lors des essais de mesure du module complexe

Températures	Fréquences réalisées (Hz)
-30°C	0,03 – 0,3 – 0,1 – 1 – 5
-15°C	0,03 – 0,3 – 0,1 – 1 – 5 – 10 – 15
0°C	0,03 – 0,3 – 0,1 – 1 – 5 – 10 – 15
15°C	0,03 – 0,3 – 0,1 – 1 – 5 – 10 – 15 – 20
30°C	0,03 – 0,3 – 0,1 – 1 – 5 – 10 – 15

En France, la déformation maximale imposée pour rester dans le domaine de linéaire du comportement viscoélastique d'un enrobé lors d'un essai cyclique est inférieure à

10^{-4} (voir chapitre 1). Étant donné que des bitumes plus rigides sont utilisés en France qu'au Québec, cette limite doit être validée pour nos enrobés. Il est essentiel de connaître cette limite avant de débiter une série d'essai; c'est un des essais de mise au point dont il sera question à la section 5.2.

4.4.3.4 L'acquisition des données

Étant donné que le système d'acquisition de données de la presse MTS fonctionne en temps réel, le temps d'acquisition de données doit être différent pour chaque fréquence d'essai (Tableau XI). La fréquence d'enregistrement maximal du système Teststar II est de 5 KHz, soit un enregistrement à toutes les 0,0002 secondes.

Tableau XI

Temps d'acquisition de données en fonction de la fréquence d'essai pour les essais de module complexe

Fréquence (Hz)	Temps enregistrement (sec)	Fréquence d'enregistrement (Hz)
20	0,0005	2000
15	0,0006	1667
10	0,001	1000
5	0,002	500
1	0,01	100
0,3	0,03	33
0,1	0,1	10
0,03	0,3	3

4.5 Aspects métrologiques

La métrologie est la science des mesures. Avant d'utiliser des appareils qui vont mesurer la déformation, la charge ou la température, il faut s'assurer qu'ils sont bien étalonnés et que l'on connaît leurs limites d'utilisation.

4.5.1 La température dans l'enceinte

Afin de vérifier l'homogénéité de la température dans l'enceinte thermique, des thermocouples ont été collés sur une éprouvette d'enrobé bitumineux à l'aide de butyl de caoutchouc (figure 4.10 et 4.11). Les thermocouples utilisés sont de type T et les données sont recueillies par le système d'acquisition de données 5000.

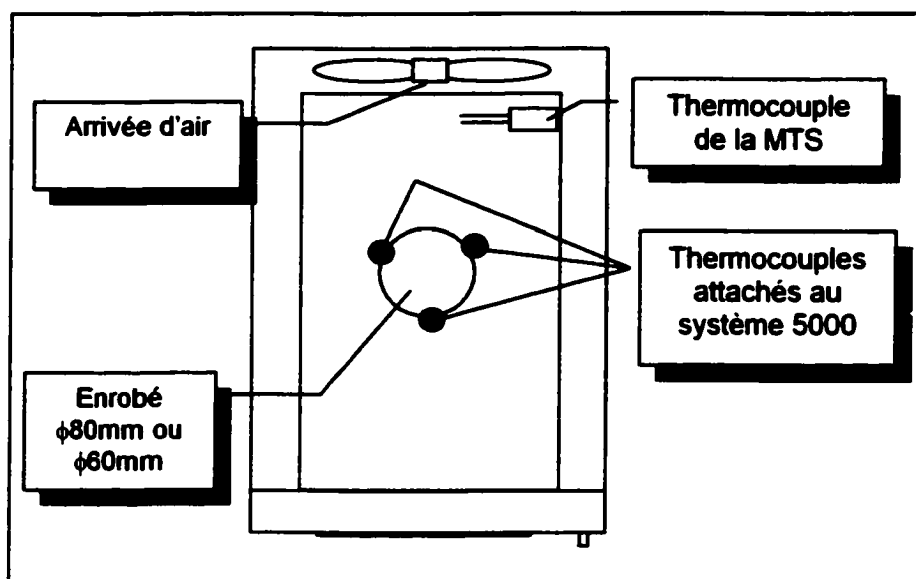


Figure 4.10 : Schéma en plan de l'enceinte thermique avec le positionnement des thermocouples sur l'éprouvette reliés au système d'acquisition de données 5000

La collecte des données a eu lieu lors d'essais de module complexe ainsi qu'au cours d'essais de retrait thermique empêché. Les résultats seront présentés et analysés au chapitre V.

Il est important de noter que la température utilisée comme étant celle de référence pour les calculs est celle donnée par les thermocouples à la surface de l'enrobé et non celle de l'enceinte.

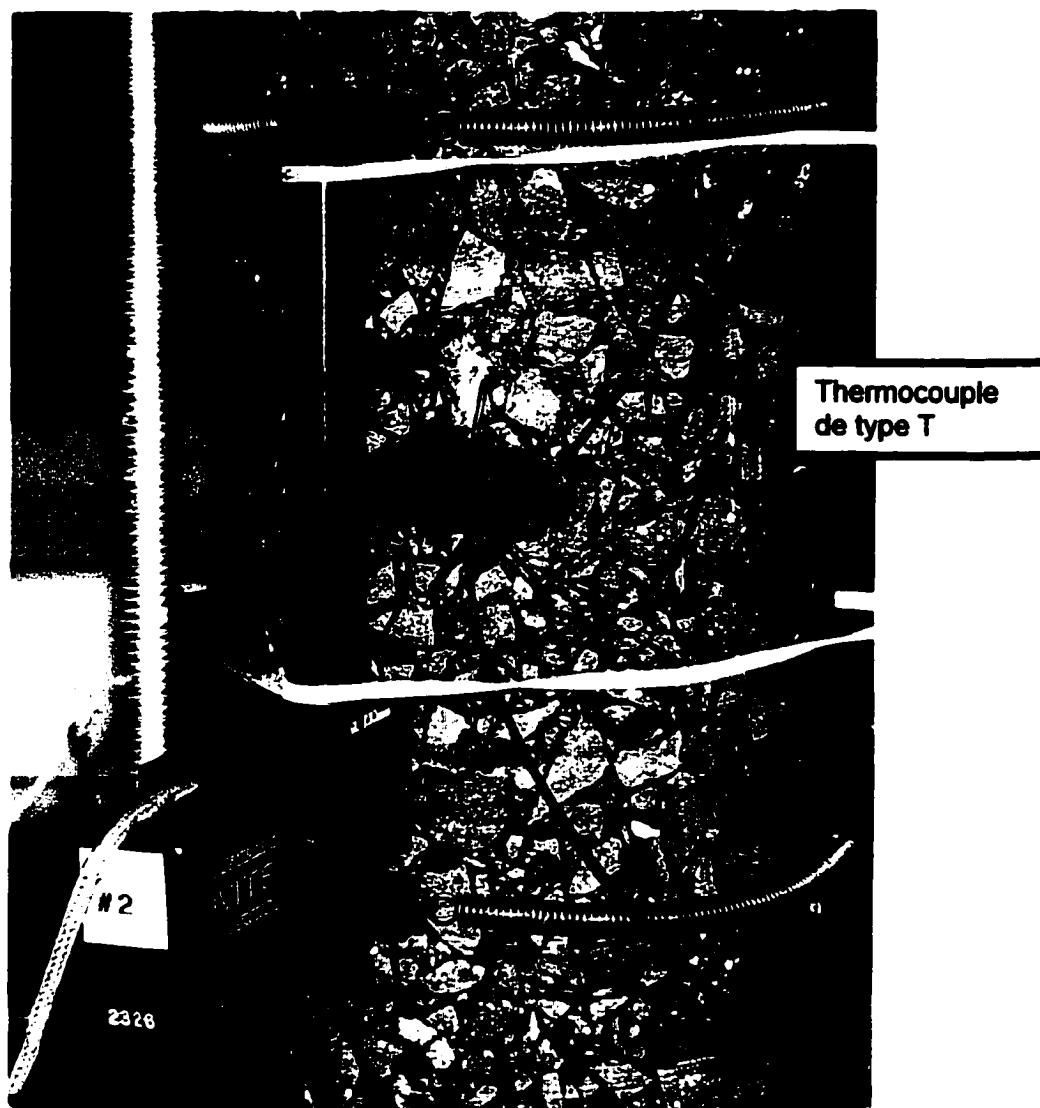


Figure 4.11 : Thermocouple collé à la surface d'une éprouvette

4.5.2 La précision des extensomètres

La précision des extensomètres est également un élément important. C'est cette précision qui dictera la précision des résultats de module complexe et la grandeur de la déformation minimale atteignable sans entrer dans le bruit de l'appareil.

Pour vérifier la précision des extensomètres, un appareil d'étalonnage mécanique est utilisé (figure 4.12). L'appareil est gradué au $2\text{ }\mu\text{m}$. Un extensomètre est attaché solidement sur l'appareil. On compare la déformation mesurée à l'aide du système d'acquisition de données à celle imposée par l'appareil d'étalonnage. Il est à noter que MTS déconseille de vérifier la précision en alternant une déformation positive et une déformation négative. Les résultats de l'étalonnage seront présentés et analysés au chapitre V.



Figure 4.12 : Appareil MTS d'étalonnage des extensomètres

4.5.3 La précision de la cellule de charge

La cellule de charge utilisée a une capacité de 100 kN. Cette cellule peut être réglée pour fonctionner de 0 kN à 100 kN ou de 0 kN à 10 kN. Pour les essais de module

complexe, le réglage est fixé à 10 kN, tandis que le réglage est à 100 kN pour les essais de retrait thermique empêché.

La précision de la cellule de charge a été établie à partir d'un anneau de force (figure 4.13). Pour vérifier la précision, une force est appliquée par le vérin, par l'entremise de la cellule de charge, sur l'anneau qui se déforme. En comparant la déformation avec la charte de calibration de l'anneau, une force équivalente est trouvée puis comparée à celle donnée par la cellule de charge. Les résultats de cette investigation seront présentés et analysés au chapitre V.

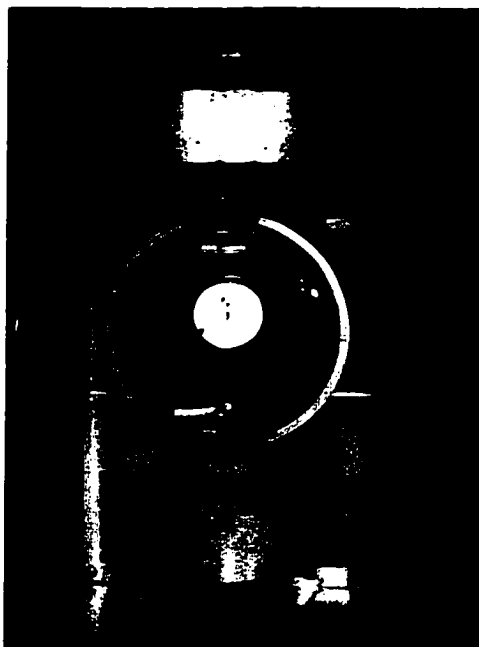


Figure 4.13 : Anneau de force utilisé pour vérifier la précision de la mesure de la cellule de charge

4.5.4 Les paramètres d'asservissement

La position et la force peuvent osciller avant même qu'un essai débute (Soltani 1998). Afin de minimiser ces oscillations indésirables, des paramètres d'asservissements de la

presse sont ajustables. Ces paramètres, identifiés P, I, D et F représentent le gain (proportional gain), la dérive (Rate derivative), l'intégration (Reset integration) et l'anticipation (Feed forward). L'ajustement de ces paramètres améliore la stabilité et la précision de la presse (MTS 1998).

L'ajustement de ces paramètres est à faire à chaque changement de température, de fréquence ou de type de matériau. De plus, ces paramètres prennent une valeur différente si le contrôle se fait en force, en déplacement ou en déformation. Pour faire ces ajustements, il faut utiliser un générateur de fonction et commander un signal oscillatoire (sinusoïdal, carré ou triangulaire). Dans le cas de l'utilisation d'extensomètres, un signal triangulaire est recommandé pour faire de bons ajustements. Le signal carré donne trop de secousses et fait vibrer excessivement les extensomètres ce qui nuit à la précision des lectures. L'expérience, une bonne connaissance des capacités de la presse, et surtout beaucoup de patience sont les seuls moyens d'ajuster ces paramètres.

4.5.4.1 P (Proportional gain)

Le gain doit prendre la valeur la plus élevée possible sans devenir instable. Un gain élevé augmente la vitesse de réponse du système. Trop de gain peut causer une oscillation dans le signal (figure 4.14).

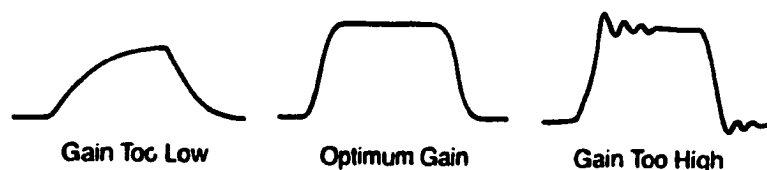


Figure 4.14 : L'ajustement du gain (Source : MTS 1998)

À basse température (-30°C) et haute fréquence ($>5\text{ Hz}$), le gain doit être ajusté assez haut. Par contre, ce niveau de gain ne peut rester le même lorsque la presse est

arrêtée car il y aura oscillation. Pour contrer cet effet, le gain doit être augmenté graduellement dès le début de l'essai cyclique. Une augmentation trop rapide amène également une oscillation.

4.5.4.2 D (Rate derivative)

La dérive anticipe le taux de changement du signal. Si la dérive est trop basse, la presse émet un grondement et si la dérive est trop élevée, un cillement se fait entendre. Si la dérive est bien ajustée, la presse est silencieuse (figure 4.15).

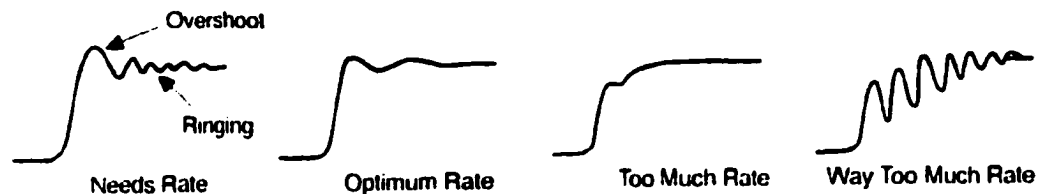


Figure 4.15 : L'ajustement de la dérive (Source : MTS 1998)

4.5.4.3 I (Reset integration)

L'intégration améliore la précision de la moyenne du signal. L'intégration est habituellement ajustée à 10% du gain (figure 4.16).

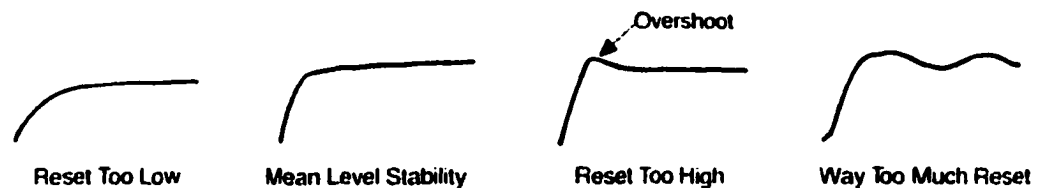


Figure 4.16 : L'ajustement de l'intégration (Source : MTS 1998)

4.5.4.4 F (Feed forward)

Cet ajustement n'est pas toujours nécessaire. Il permet d'anticiper de combien la vanne qui contrôle l'entrée d'huile au vérin devra ouvrir pour atteindre le signal désiré au temps désiré (figure 4.17). L'anticipation est surtout utile lorsqu'une éprouvette peu rigide (enrobé à haute température) est testée en contrôle de force.

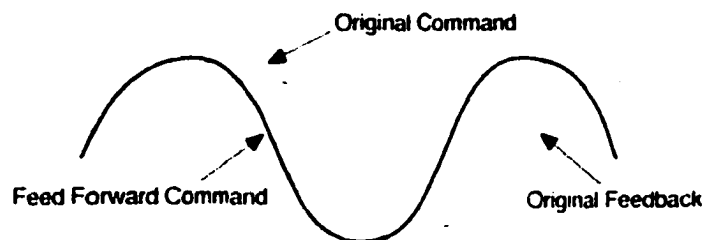


Figure 4.17 : L'ajustement de l'anticipation (Source : MTS 1998)

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Dans le programme expérimental, nous avons évoqué l'ensemble des paramètres étudiés. Ce chapitre se veut la synthèse des résultats obtenus pour les différents essais effectués.

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première partie présente les résultats liés aux essais de mise au point et d'étalonnage. La deuxième partie traite des résultats liés à la caractérisation des enrobés EG-10A et EG-10B. Finalement, les méthodologies proposées sont présentées en troisième partie.

5.2 Les essais de mise au point

Les essais de mise au point réalisés sont : 1) la vérification de l'uniformité de la température à la surface de l'éprouvette, 2) la précision des extensomètres, 3) la précision de la cellule de charge, 4) les paramètres d'asservissement et 5) la limite de linéarité du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux testés. La presse MTS et le système d'acquisition de données Testware SX de TestStar II ont été installés il y a environ un an et toutes les étapes d'étalonnage ont été faites par le technicien de MTS.

5.2.1 Uniformité de la température à la surface de l'éprouvette

Pour vérifier l'uniformité de la température à la surface de l'éprouvette, des thermocouples ont été collés à sa surface. Trois thermocouples de type T, placés à mi-hauteur de l'éprouvette ont été utilisés. Deux des thermocouples ont été positionnés face au système de ventilation tandis que le troisième est placé devant l'éprouvette (figure 5.1). Il est opportun de préciser que les thermocouples utilisés (type T) ont une

précision de 0,5°C (Omega 1998) et qu'ils ont été étalonnés dans de la glace fondante avant leur utilisation (tableau XII). Cet étalonnage se fait en utilisant des cubes de glace d'eau distillée broyée qui sont ajoutés dans de l'eau distillée. Un thermomètre étalon est placé dans ce bain de glace pendant au moins 20 minutes pour s'assurer de la stabilité de la température avant d'y introduire les thermocouples. Les thermocouples sont introduit d'environ 3 cm dans le bain et la lecture est prise après trois minutes d'immersion.

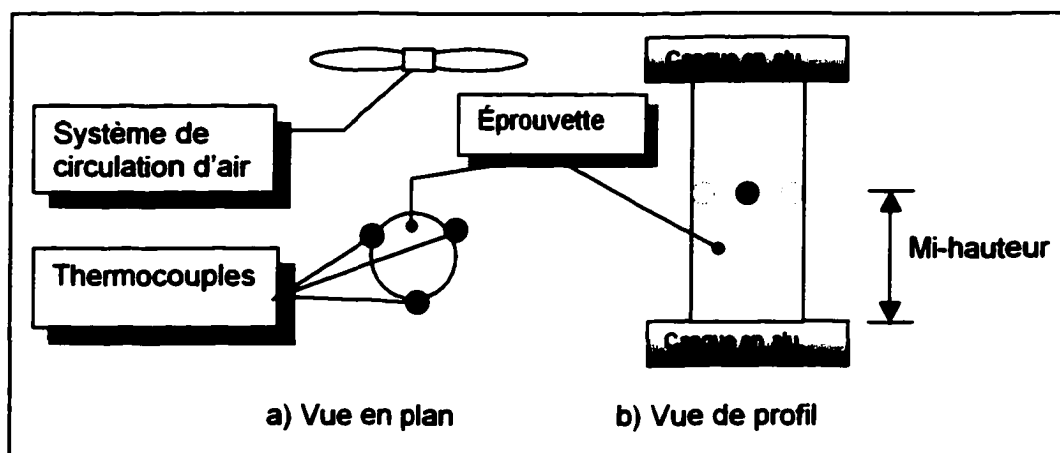


Figure 5.1 : Schéma en plan et en profil du positionnement des thermocouples à la surface de l'éprouvette

Tableau XII

Étalonnage des trois thermocouples utilisés en vérifiant le zéro

	Température de référence (thermomètre étalon)	Essai			
		a	b	c	Moyenne
Thermocouple	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1	0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,17
2	0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,10
3	0	-0,1	0,0	0,0	-0,03

L'évaluation de l'homogénéité de la température à la surface de l'éprouvette a été conduite selon deux cas de figures. 1) homogénéité à la surface de l'éprouvette selon

une consigne de température fixe, et 2) homogénéité à la surface de l'éprouvette selon une consigne variable en cours de refroidissement. Le premier cas de figure s'applique essentiellement aux mesures de modules complexes, lesquelles se font en conditions isothermes. Le deuxième cas de figure est relié, quant à lui, à l'essai de TSRSTS.

5.2.1.1 Temps de stabilisation de la température

Comme mentionné dans les chapitres précédents, une période de conditionnement des éprouvettes à une température donnée de quatre heures a été utilisée au lieu d'une période de six heures tel que suggérée dans certaines normes. Les résultats présentés à la figure 5.2 montrent qu'après 160 minutes, la température à la surface de l'éprouvette est stable lors d'un conditionnement à -15°C pour une éprouvette qui se trouvait à la température ambiante au début de l'essai (figure 5.2). Il est à noter que l'augmentation de température observée à 250 minutes est produite par l'ouverture de la porte de l'enceinte.

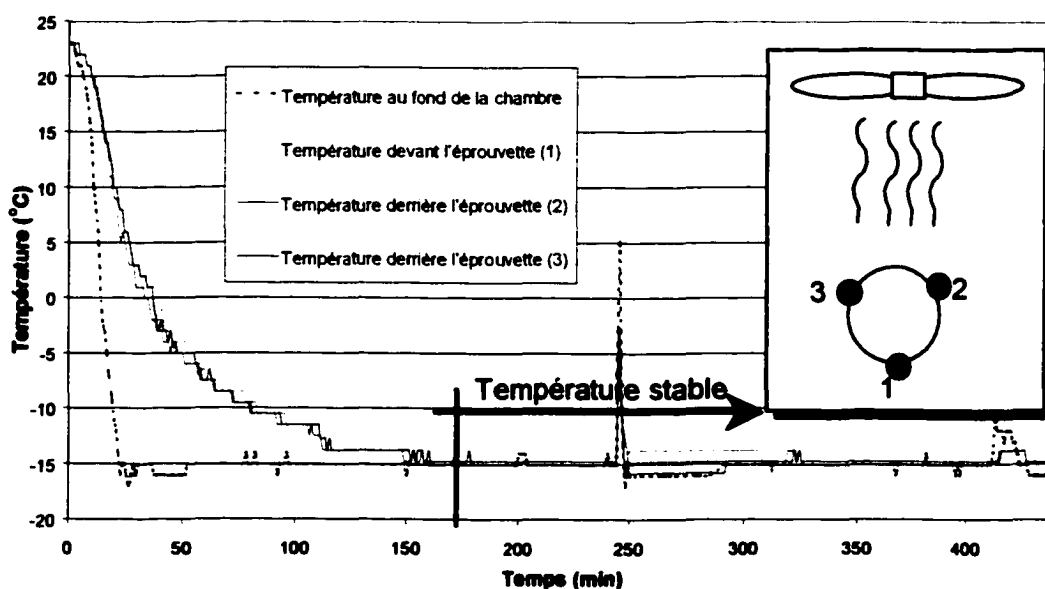


Figure 5.2 : Évolution de la température dans l'enceinte et à la surface d'une éprouvette lors d'un conditionnement à -15°C pour un essai de mesure du module complexe

En utilisant une période de conditionnement de quatre heures, nous sommes donc certain d'avoir une température homogène dans l'éprouvette.

5.2.1.2 Homogénéité de la température à la surface de l'éprouvette selon une température de consigne fixe

Compte tenu de la plage de température balayée pour évaluer le module complexe d'un enrobé (-30°C à $+30^{\circ}\text{C}$), l'homogénéité de la température selon une consigne donnée a été évaluée pour cinq températures, soit : $+30^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$, $+5^{\circ}\text{C}$, -15°C et -25°C . La relation entre la température de la consigne et la température à la surface de l'échantillon après un conditionnement de quatre heures est présenté à la figure 5.3. Ces valeurs ont été calculées à partir des données de la températures prises à toutes les minutes durant les essais. Il est à noter qu'il y a un nombre de points différents à chaque température de consigne sur la figure 5.3 car la température n'a pas été vérifié lors de tout les essais à cause de l'indisponibilité du système de mesure (système 5000).

Les résultats présentés à la figure 5.3 montrent qu'il y a un certain décalage entre la température de consigne et celle mesurée par les thermocouples à la surface de l'éprouvette. Ce décalage peut être corrigé en utilisant les équations des droites de régression inscrites à la figure 5.3.

Le tableau XIII donne les valeurs des températures individuelles mesurées pour chacun des thermocouples et les valeurs moyennes calculées pour le groupe. Les résultats du tableau XIII indiquent que dans la mesure où l'on accorde un temps suffisant pour permettre la stabilisation de la température au sein de l'éprouvette, l'écart de la température à la surface de l'éprouvette entre la position arrière et la position avant est négligeable. Le cas contraire aurait indiqué la présence d'un champ de contrainte non-homogène au sein de l'éprouvette, compte tenu du fait que la rigidité d'un enrobé est fortement tributaire de la température.

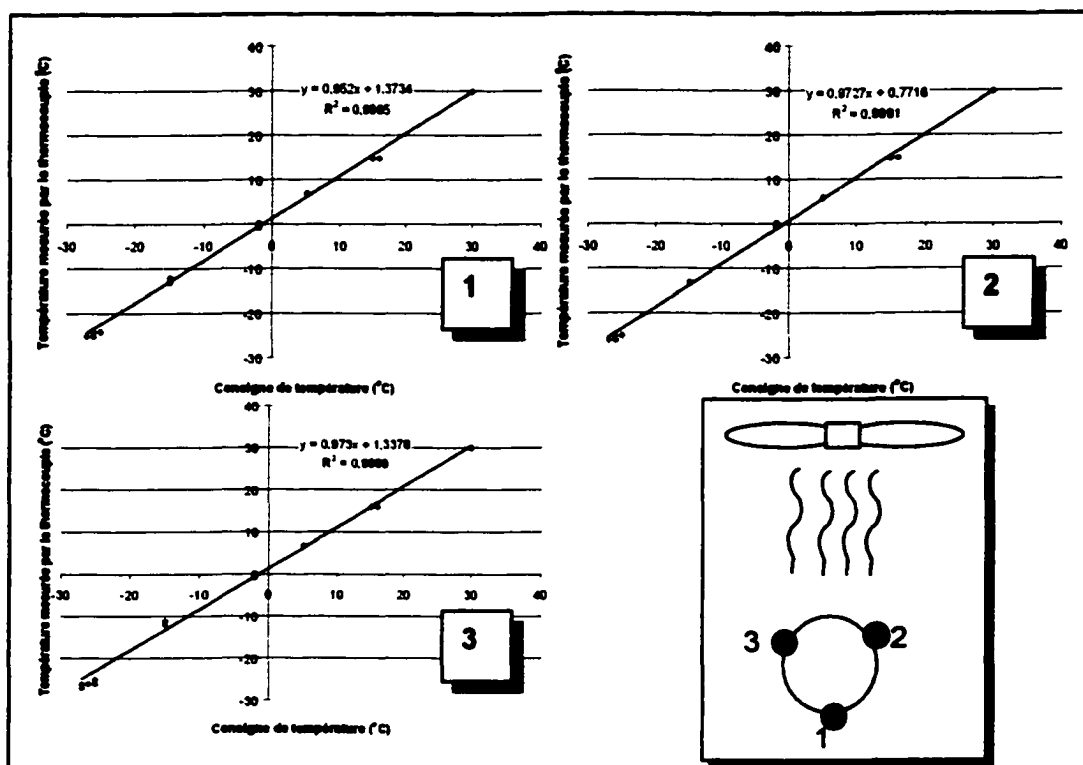


Figure 5.3 : Relation entre la température à la surface d'une éprouvette et celle de la consigne lors d'un essai de module complexe (4 heures de conditionnement)

Tableau XIII

Températures mesurées par chacun des thermocouples collés à la surface de l'éprouvette pour une température de consigne fixe

		Température de la consigne (°C)				
		30	15	5	-15	-25
Température mesurée à la surface (°C)	Canal 1	30,5	15,0	7,0	-12,0	-24,0
	Canal 2	30,0	15,0	6,0	-13,5	-26,0
	Canal 3	30,0	15,0	7,0	-13,5	-25,0
	Moyenne	30,2	15,0	6,3	-13,0	-25,0
	Écart-type	0,29	0,00	0,58	0,87	1,00

5.2.1.3 Homogénéité de la température à la surface de l'éprouvette selon une consigne de température variable en cours de refroidissement

Lors d'un essai de retrait thermique empêché, la consigne de refroidissement est de $10^{\circ}\text{C} / \text{heure}$. La figure 5.4 montre l'évolution de la température mesurée aussi bien à la surface de l'éprouvette (mi-hauteur) que celle de la consigne dans l'enceinte lors d'un refroidissement.

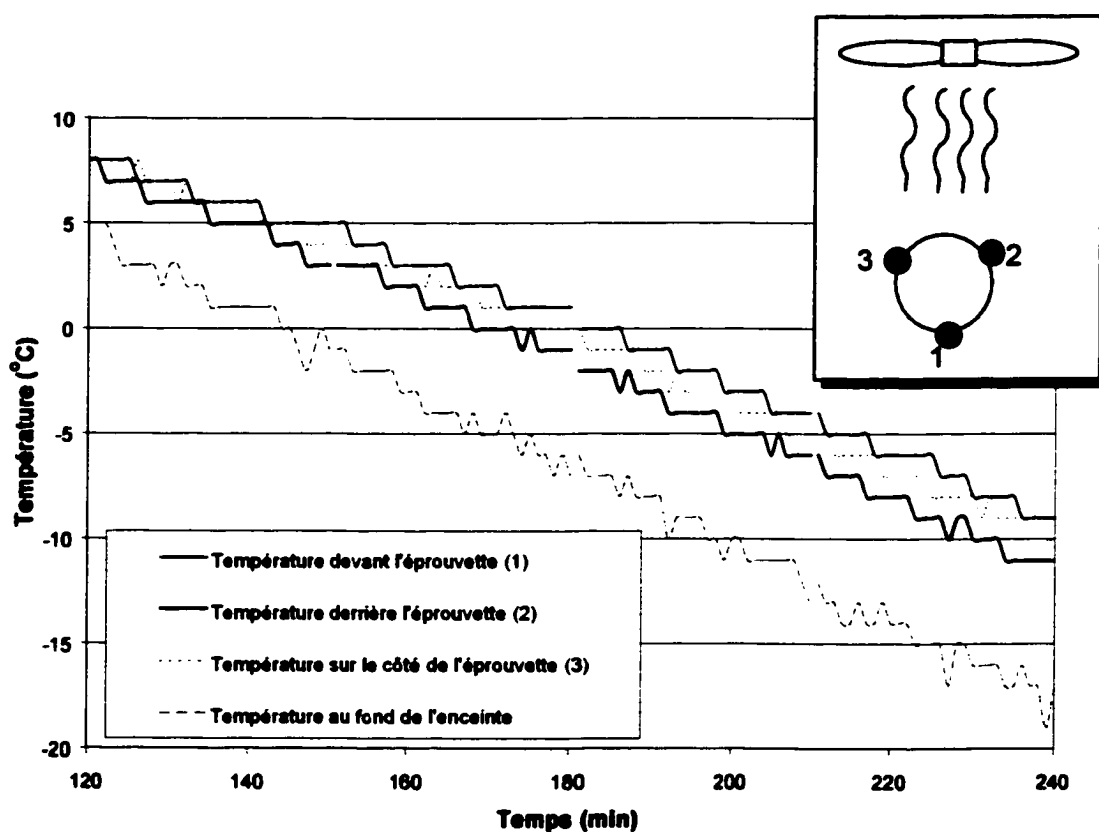


Figure 5.4 : Évolution de la température dans l'enceinte thermique et à la surface d'une éprouvette durant un essai de retrait empêché

Les résultats montrent que d'une part l'évolution de la température en cours de refroidissement se présente en paliers successifs et que d'autre part, la température moyenne à la surface de l'éprouvette est différente de celle de la consigne; un écart

moyen d'au moins 5°C est observable. De surcroît, cet écart augmente au fur et à mesure que la température dans l'enceinte diminue. La température de la consigne est la température utilisée comme température de référence par le système d'acquisition de données lors d'un essai de retrait thermique empêché. C'est donc dire que le taux de refroidissement au sein de l'éprouvette n'est pas constant lorsqu'on impose un taux de refroidissement constant en référence à la température de consigne de l'enceinte. Afin de connaître la température exacte à laquelle l'éprouvette se trouve au cours de l'essai, on doit soit utiliser des thermocouples collés sur les éprouvettes à tout les essais ou bien corriger la valeur de la consigne à l'aide de l'écart mesuré lors d'un essai précédent sur un enrobé similaire. Dans ce programme expérimental, la température a été corrigée à l'aide des écarts obtenus lors des essais de mise au point.

Les résultats de la figure 5.4 montrent également qu'en cours de refroidissement, la température de la surface n'est pas homogène entre la face avant et la face arrière dans le cas de l'essai TSRSTS. L'écart moyen entre les thermocouples est d'environ 1°C.

Le tableau XIV présente la synthèse des résultats de la figure 5.4 de manière à faire ressortir la variation du taux de refroidissement en cours d'essai. Les résultats indiquent que le taux de refroidissement change en cours d'essai ce qui a pour effet d'augmenter l'écart entre la température de consigne et les températures mesurées sur l'éprouvette. En fait, le taux de refroidissement mesuré par les thermocouples est différent de celui de la consigne en début d'essai et il s'en rapproche au fur et à mesure que la température diminue. Donc, même si le taux de refroidissement mesuré par les thermocouples est semblable à celui de la consigne en fin d'essai, l'écart de température entre la consigne et celle à la surface de l'éprouvette reste tangible du début à la fin.

Tableau XIV

Évolution du taux de refroidissement en °C/h en cours d'essai TSRSTS évalué à partir de chacun des thermocouples

		Intervalle de temps			
		120-150 min	150-180 min	180-210 min	210-240 min
Taux de refroidissement (°C/h)	Canal 1	12	8	8	10
	Canal 2	6	8	8	10
	Canal 3	10	8	10	10
	Consigne	10			

5.2.2 La précision des extensomètres

La précision des extensomètres a été vérifiée à l'aide d'un micro-vernier pour l'étalonnage d'extensomètres MTS. La synthèse des résultats de cette vérification pour chacun des trois extensomètres est présentée aux figures 5.5, 5.6 et 5.7. La précision des extensomètres a été vérifiée de $-0,02$ mm à $0,02$ mm. Cette plage de valeur couvre amplement les valeurs utilisés lors des différents essais.

L'incertitude des extensomètres mesurée à l'aide d'une mesure étalon est de $0,00123$ mm soit $1,23$ μm . Cette précision donne une précision de $7,45$ micro déformations (μdef) lorsque les extensomètres de 165 mm sont utilisées et $12,3$ micro déformations (μdef) lorsque ce sont ceux de 100 mm. Le calcul des incertitudes est présenté à l'annexe 5.

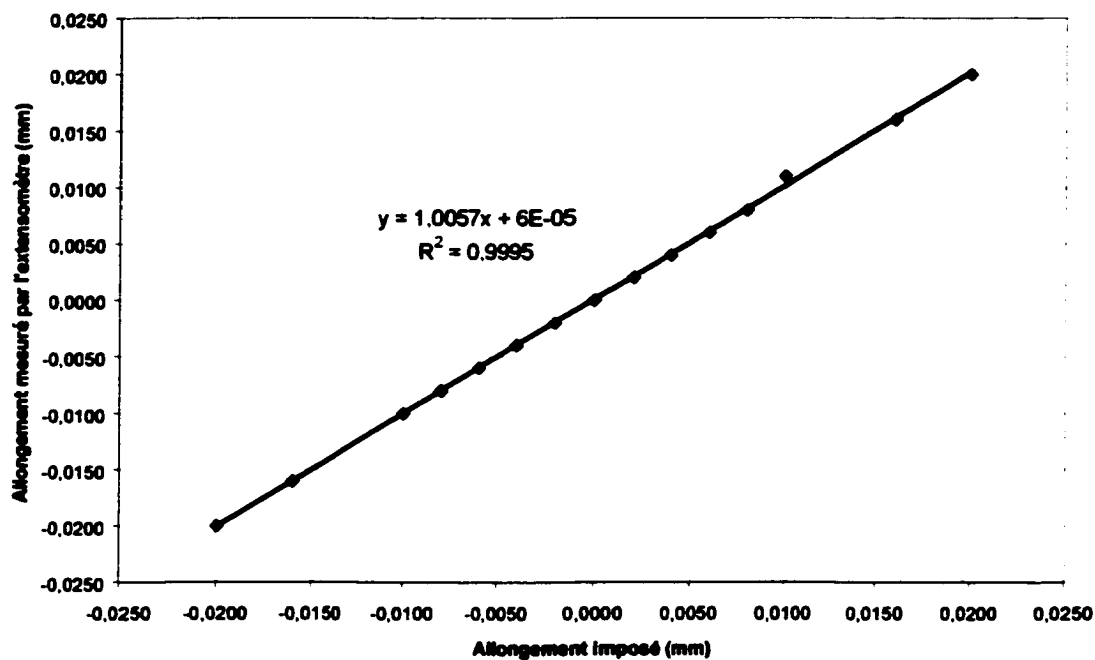


Figure 5.5 : Étalonnage de l'extensomètre #2325

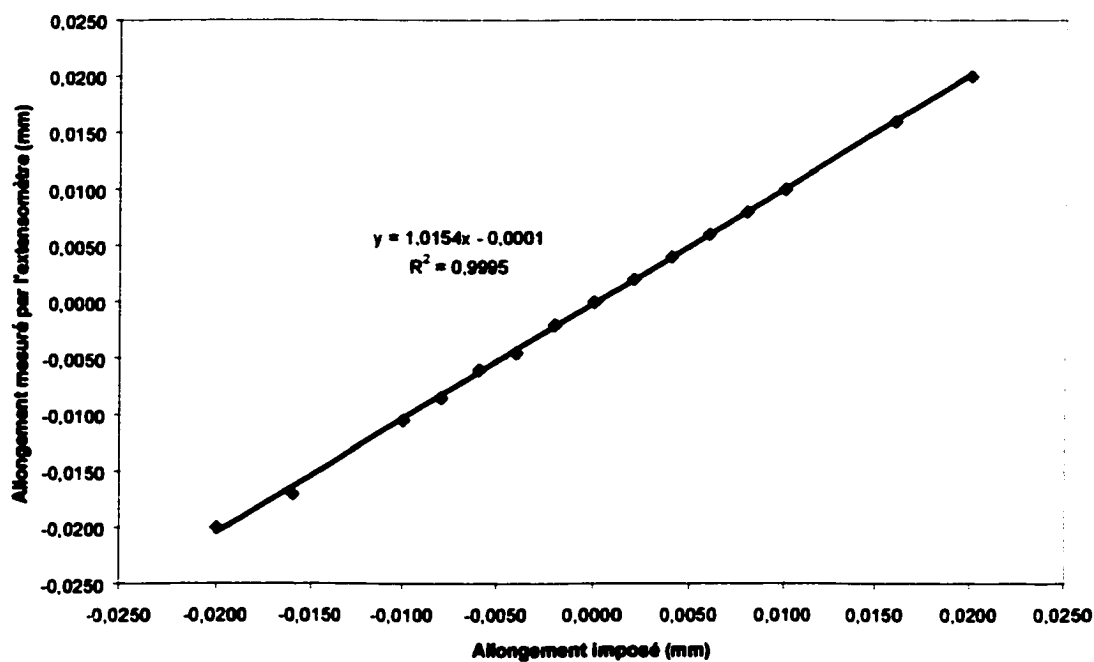


Figure 5.6 : Étalonnage de l'extensomètre #2326

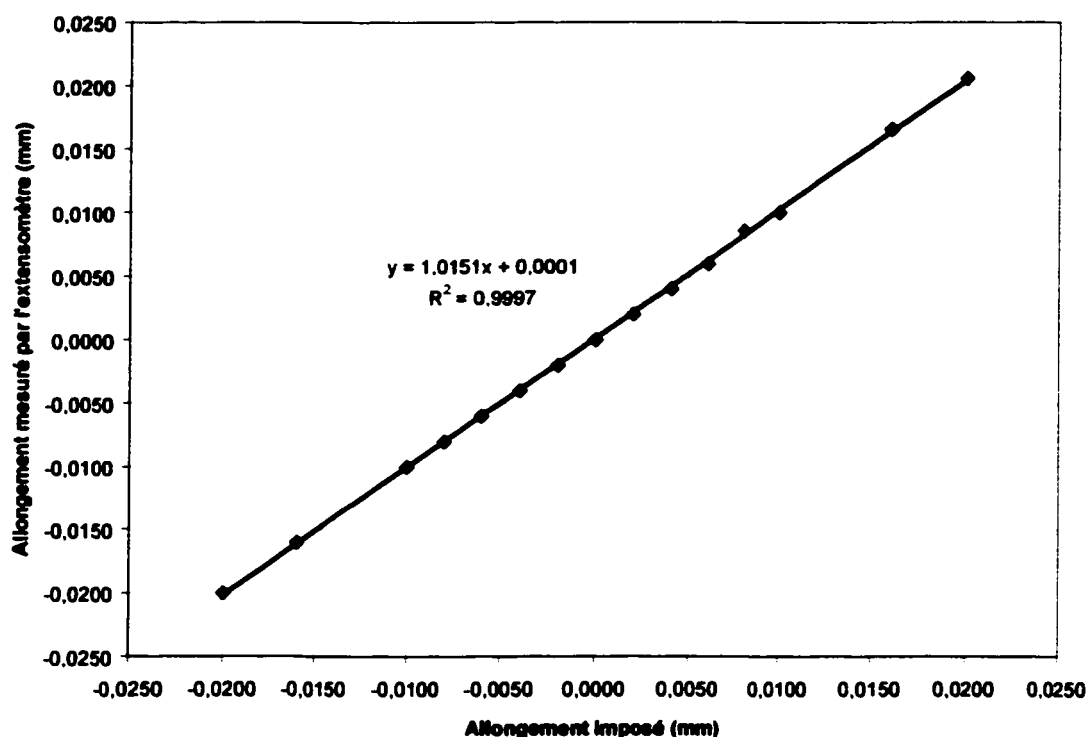


Figure 5.7 : Étalonnage de l'extensomètre #2332

5.2.2.1 Homogénéité du champ de contrainte en cours d'essai

L'homogénéité du champ de contrainte au sein de l'éprouvette est vérifiée en cours d'essai en suivant l'évolution de la déformation de chacun des extensomètres indépendamment. Rappelons cependant que le pilotage de l'essai se fait à partir de la déformation moyenne des trois extensomètres.

Deux vérifications ont été faites afin de s'assurer de l'homogénéité du champ de contrainte. La première vérification consiste à comparer la déformation moyenne à la déformation mesurée par chacun des extensomètres. En admettant une valeur de moyenne de zéro, il y aura des valeurs positives et d'autres négatives. La synthèse de cette vérification est présentée à la figure 5.8 et au tableau XV.

Les valeurs du tableau XV semblent montrer très peu d'uniformité si les valeurs non corrigées sont considérées. De tels écarts sont tout à fait normaux. En effet, chaque fois que la moyenne des valeurs donne zéro, l'écart tend vers une valeur infini. L'écart est mesuré en divisant la différence entre la valeur d'un extensomètres et la moyenne par la moyenne.

À cause de la précision, le zéro n'est pas exactement à zéro, donc l'écart calculé lorsque la déformation moyenne passe par zéro donne une valeur élevée, mais pas infini. Les valeurs corrigées du tableau XV, représente ces mêmes écarts sans toutefois tenir compte des valeurs lorsque la déformation moyenne est zéro. La figure 5.8 montre bien l'écart qui augmente lorsque la moyenne des lectures approchent zéro.

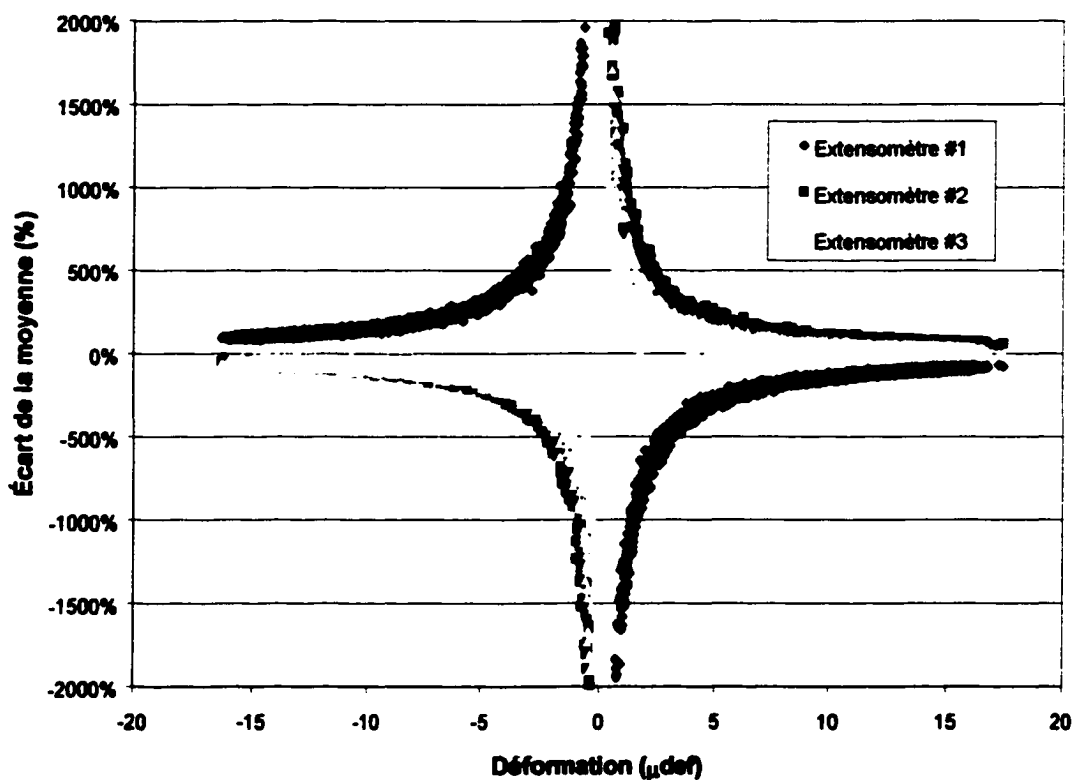


Figure 5.8 : Dispersion des écarts de lecture des extensomètres autour de la moyenne

Tableau XV

Uniformité de la lecture des extensomètres lors d'un essai cyclique en tension-compression (extensomètre de 100mm)

	Moyenne corrigée	Maximum corrigée	Moyenne non corrigée	Maximum non corrigée
Écart de la moyenne (valeur absolue)	7,0 %	30,3 %	66,0 %	13 727 %

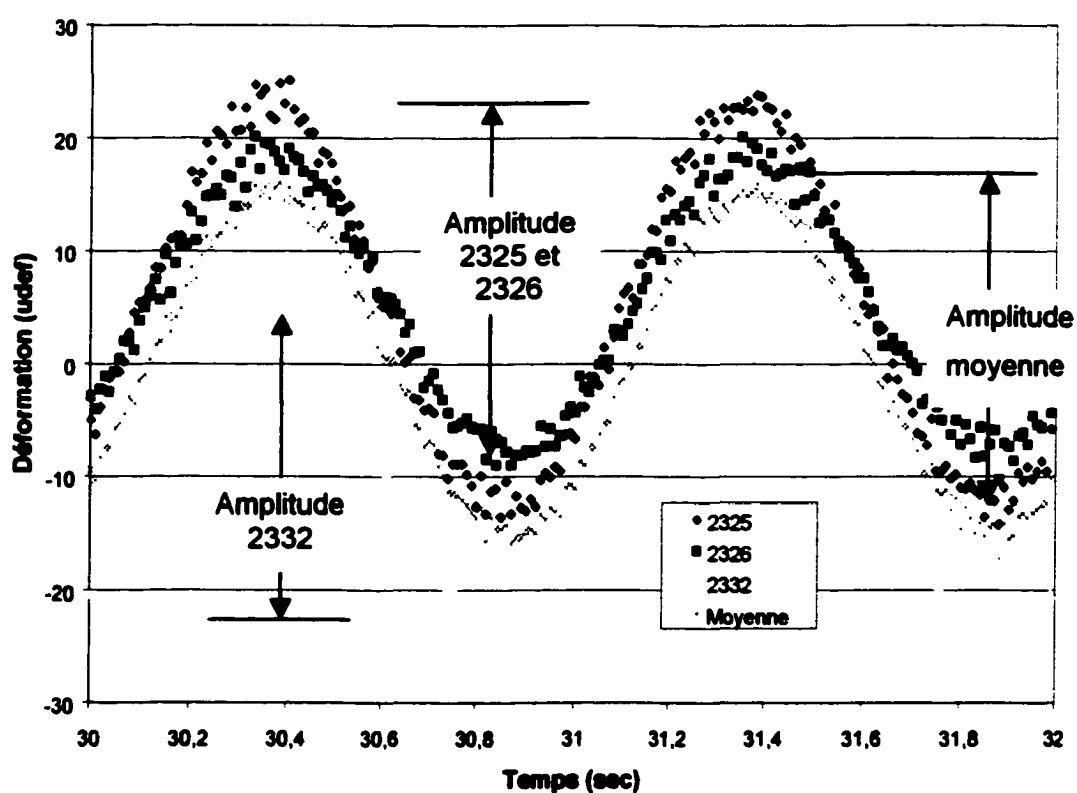


Figure 5.9 : Comparaison entre les amplitudes des déformations mesurées par les trois extensomètres et l'amplitude moyenne (extensomètres : 2325, 2326 et 2332)

Une manière plus représentative pour vérifier l'homogénéité du champ de contrainte consiste à comparer l'amplitude du signal de chacun des extensomètres avec l'amplitude moyenne (figure 5.9). Il est important de vérifier l'écart des amplitudes (ΔA) de chacun des extensomètres à l'amplitude moyenne de façon individuelle puisque dans le cas où de la flexion est induite dans l'éprouvette, il est possible que l'amplitude moyenne demeure inchangée (figure 5.10). Sur la figure 5.10b, il y a apparition de flexion dans l'éprouvette à cause d'une excentricité de la force longitudinale appliquée, mais la moyenne des déformations mesurées est égale à la moyenne des déformations mesurées sur la figure 5.10a. Les résultats de cette vérification sont présentés au tableau XVI. Les valeurs du tableau XVI sont celles d'une éprouvette testée à 0°C.

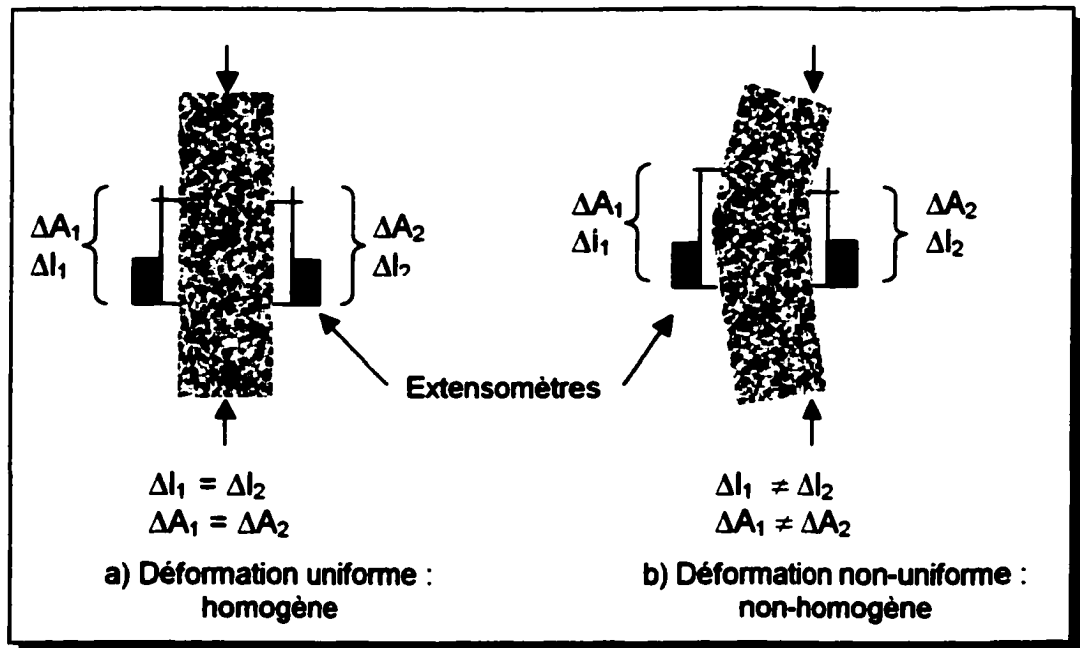


Figure 5.10 : Schéma illustrant la mesure de la déformation d'une éprouvette à l'aide d'extensomètre

Comme souligné au chapitre I, des écarts d'amplitude de plus de 25% sont inacceptables car ils impliquent une hétérogénéité importante dans le champ de contrainte (Soltani 1998). Ici, l'écart maximal mesuré de 18,4% est jugé tout à fait acceptable. Il est à noter que cette vérification est faite à chacun des essais.

Tableau XVI

Écart entre les amplitudes des déformations de chacun des extensomètres et l'amplitude moyenne lors d'un essai de mesure du module complexe (0°C)

Fréquence		2325	2326	2332	moyenne
0,03Hz	Amplitude (μdef) % écart	32,4 3,2%	36,5 16,2%	30 -4,5%	31,4
0,1Hz	Amplitude (μdef) % écart	33,2 5,7%	35,3 12,4%	28,7 -8,6%	31,4
0,3Hz	Amplitude (μdef) % écart	35,3 14,6%	33,7 9,4%	28,3 -8,1%	30,8
1Hz	Amplitude (μdef) % écart	35,2 11,7%	32,6 3,5%	31,5 0,0%	31,5
5Hz	Amplitude (μdef) % écart	33,7 8,0%	30,3 -2,9%	33 5,8%	31,2
10Hz	Amplitude (μdef) % écart	29 -3,0%	31,7 6,0%	31,5 5,4%	29,9
15Hz	Amplitude (μdef) % écart	19 -7,8%	24,4 18,4%	22,9 11,2%	20,6

5.2.3 Étalonnage de la cellule de charge

La cellule de charge a été étalonnée dans la configuration de 10 kN et dans la configuration de 100 kN. Les résultats de l'étalonnage sont présentés aux figures 5.11 et 5.12. Comme pour les thermocouples, il suffit d'utiliser l'équation de la droite de régression indiquée sur les figures 5.11 et 5.12 pour corriger la lecture de la cellule de charge.

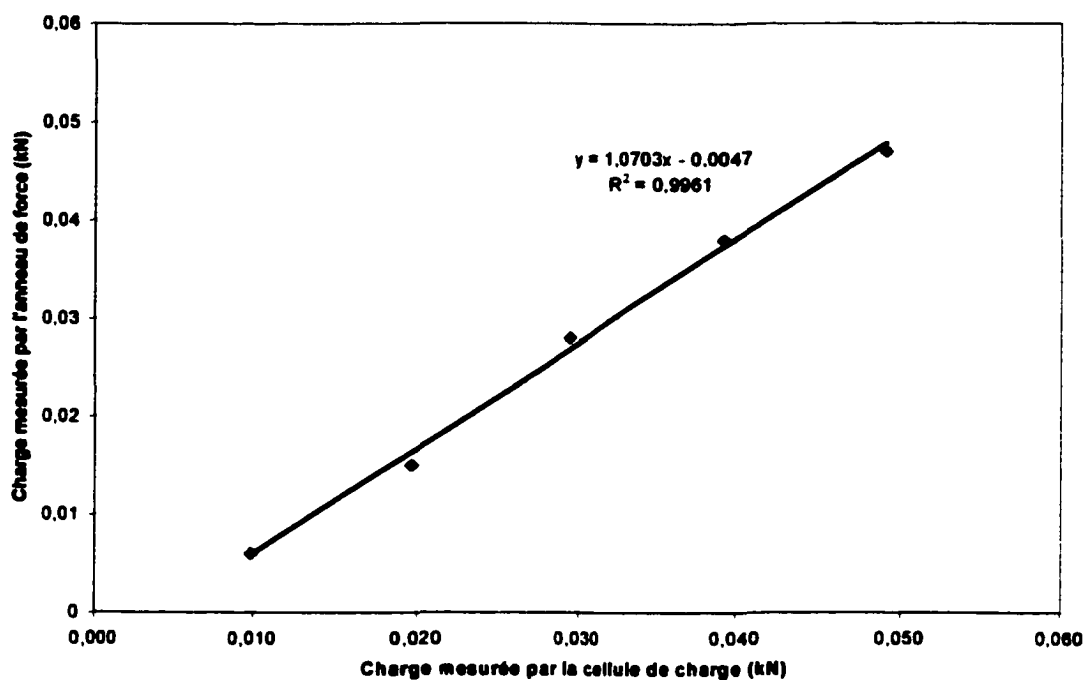


Figure 5.11 :Étalonnage de la cellule de charge réglée à 10 kN avec l'anneau de force

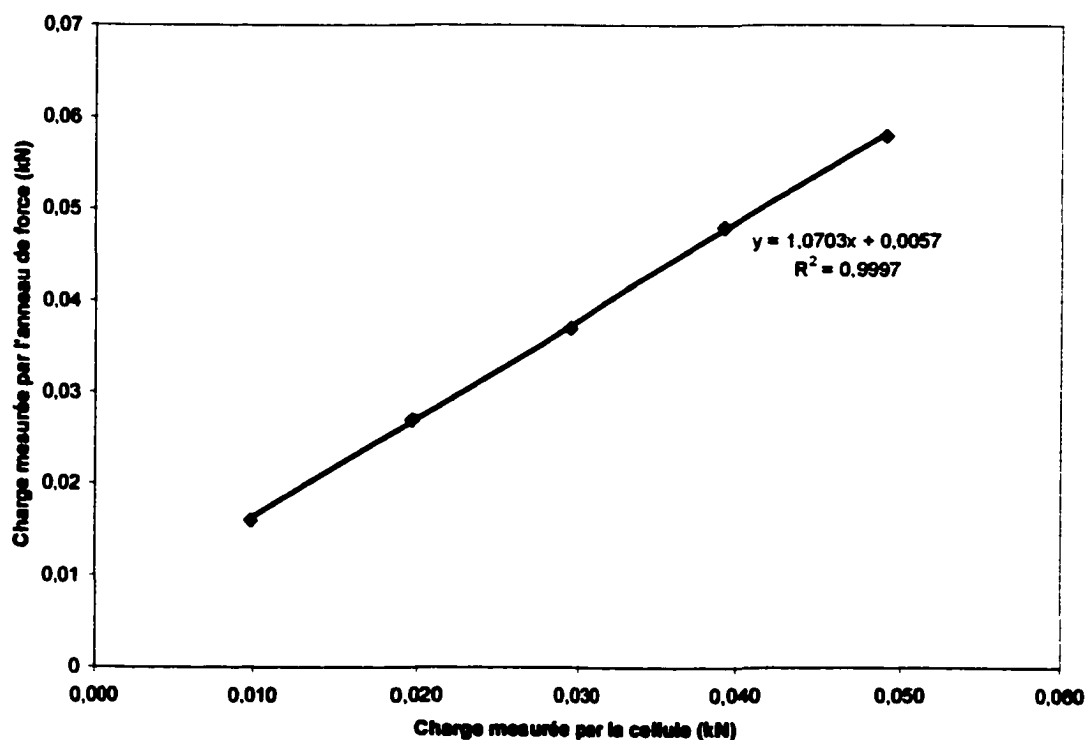


Figure 5.12 :Étalonnage de la cellule de charge réglée à 100 kN avec l'anneau de force

Une cellule de 5 kN serait mieux adaptée aux essais de module complexe. Par contre, même si les essais de retrait thermique empêché ont toujours donné des résultats en deçà de 10 kN, l'utilisation d'une cellule de 5 kN serait risquée puisque les résultats ne sont pas loin de la limite de cette cellule. L'incertitude élargie des deux cellules de charges est de 0,454 N.

5.2.4 Sommaire des incertitudes

Le calcul des incertitudes a été effectué selon les recommandations de MFQ (1995) et de Chevalier et coll (1978). Comme mentionné précédemment, l'incertitude des extensomètres est de 0,00123 mm et l'incertitude sur la cellule de charge est de 0,454 N. En combinant ces incertitudes, on obtient une incertitude totale relative de 6,39% sur les valeurs des normes du module complexe (voir annexe 5). Pour ce qui est de l'incertitude totale relative sur la contrainte lors des essais de TSRSTS, elle peut aller jusqu'à 0,05%, ce qui est négligeable.

5.2.5 Les paramètres d'asservissement

Ces paramètres doivent être ajustés selon la température, la fréquence et l'enrobé testés. L'annexe 6 donne les valeurs utilisées pour les essais de module complexe pour les deux enrobés testés.

5.2.6 La limite de linéarité du comportement viscoélastique

La limite de linéarité a été vérifiée pour les deux types d'enrobés étudiés (EG-10A et EG-10B) et a donné des résultats très similaires. Les résultats de ces essais sont présentés dans les figures 5.13 et 5.14.

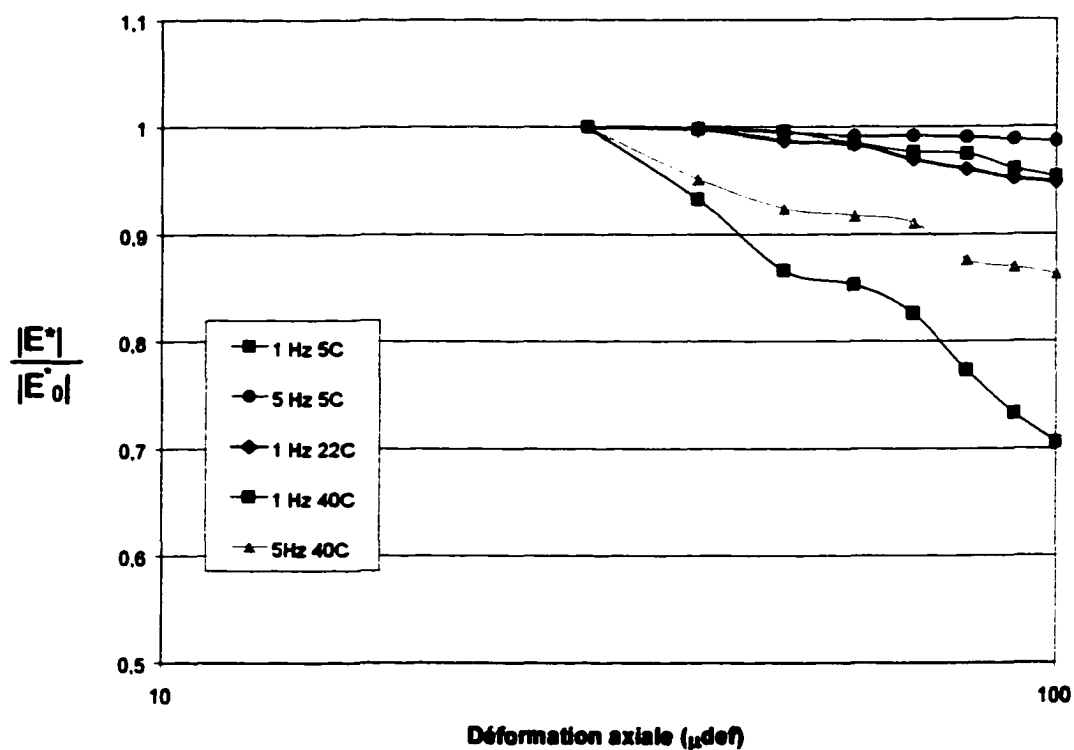


Figure 5.13 : Perte de linéarité du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux EG-10A (10% filler) en fonction de l'amplitude de la déformation

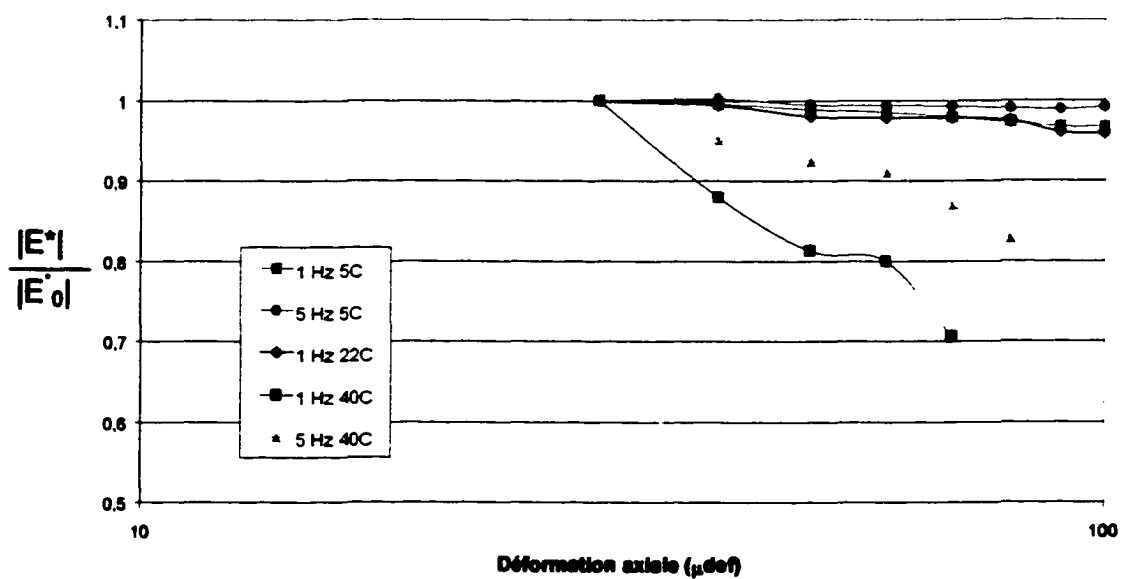


Figure 5.14 : Perte de linéarité du comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux EG-10B (7% filler) en fonction de l'amplitude de la déformation

L'ordonnée des figures 5.13 et 5.14 représente le rapport entre la norme du module calculée à une déformation donnée à la norme du module calculée à la plus petite déformation réalisable ($|E_0|$). La limite de linéarité est plus influencée par la température que par la fréquence. À 40°C, la limite est autour de 30 μdef tandis qu'à 5°C, elle est plutôt autour de 40 μdef . Pour les températures de 22°C et moins, les essais pourraient être effectués avec une déformation allant jusqu'à 100 μdef tout en donnant des valeurs très similaires de l'essai à 30 μdef .

5.3 La caractérisation des enrobés testés : module complexe et résistance à basse température

Les résultats des essais de caractérisation des deux enrobés testés (EG-10A et EG-10B) sont divisés en deux parties : 1) la résistance à la fissuration thermique et 2) le module complexe.

5.3.1 La résistance à la fissuration thermique

Lors des essais de retrait thermique empêché, l'évolution de la température ainsi que celle de la tension induite dans l'éprouvette ont été enregistrées en cours d'essais (figure 5.15 et 5.16 et tableau XVII). Il est bon de préciser que les températures indiquées dans le tableau XVII ne sont pas les températures données par le système d'acquisition de données TestStar II de la presse, mais bien les températures corrigées selon le décalage mesuré entre la température de la consigne de l'enceinte et celle à la surface de l'éprouvette (voir section 5.2.1.3). Le décalage est mesuré à chaque essai. Les figures 5.15 et 5.16 montrent l'évolution de la contrainte en fonction de la température lors des essais TSRSTS.

Sur les figures 5.15 et 5.16, on constate que l'allure générale des courbes est semblable à ce qui est rapporté dans la littérature. On constate également que la relation contrainte-température devient linéaire avec l'abaissement de la température. Le point d'inflexion associé à cette transition représente la température de transition

vitreuse (T_g). La synthèse des résultats des essais au TSRSTS est présentée au tableau XVII.

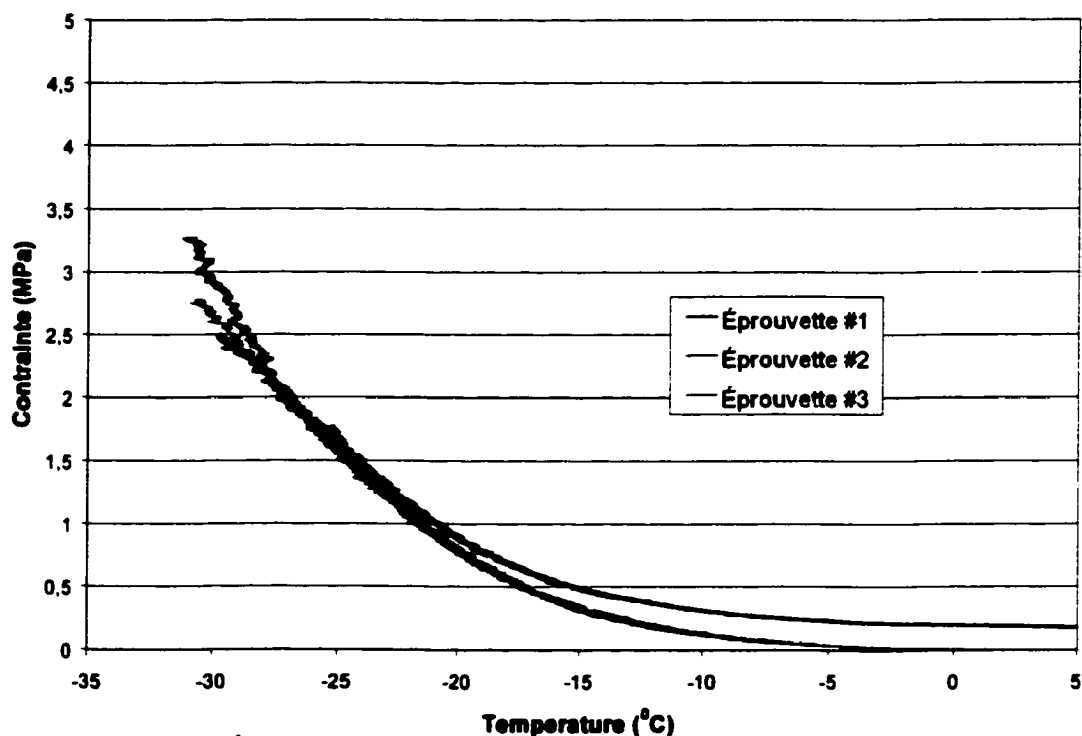


Figure 5.15 : Évolution de la contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température pour l'enrobé EG-10A

Dans le tableau XVII, on note que l'écart type maximal des contraintes à la rupture n'est pas très élevé. En fait, même si l'incertitude élargie sur la contrainte est inférieure à l'écart type maximal relatif, on peut considérer que les résultats sont semblables. Pour l'enrobé EG-10B, les mêmes observations s'appliquent.

La pente indiquée dans le tableau XVII, est la pente de la relation contrainte-température en deçà du T_g montrée aux figures 5.15 et 5.16. Plus la pente est élevée, plus la susceptibilité thermique de l'enrobé est grande. L'analyse des résultats sera élaborée au chapitre VI.

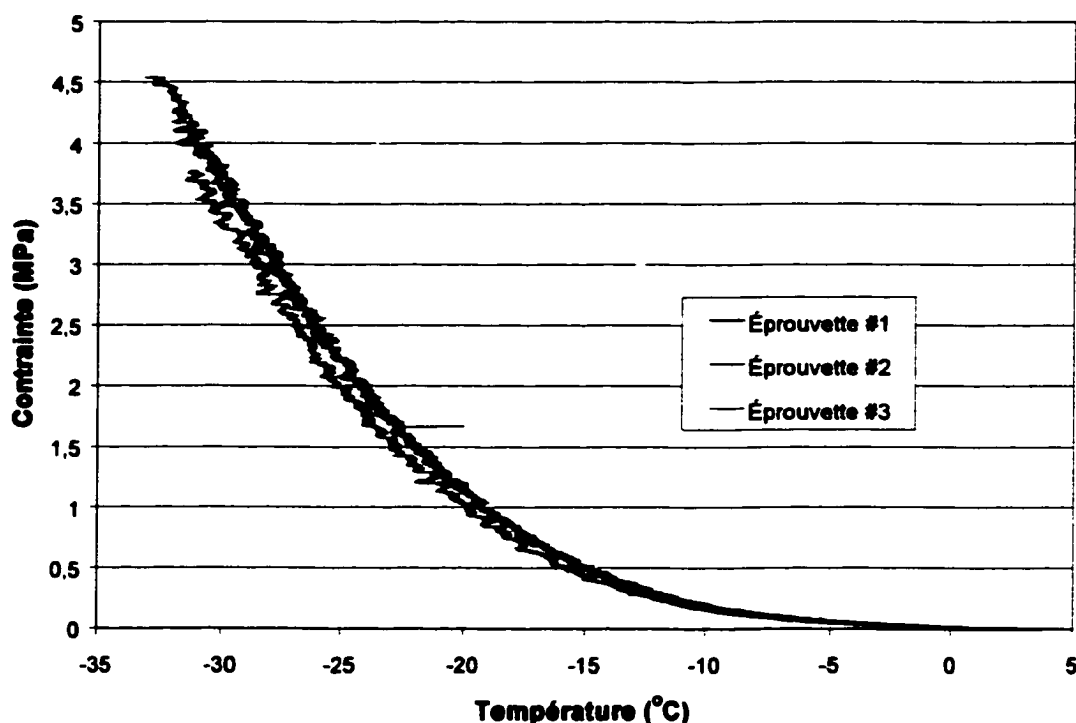


Figure 5.16 : Évolution de la contrainte induite par le retrait thermique empêché en fonction de la température pour l'enrobé EG-10B

Un détail qui n'est pas perceptible dans le tableau XVII, est l'emplacement de la fissuration sur l'éprouvette. Étant donné que l'on positionne les extensomètres à la mi-hauteur des éprouvettes, on espère que la fissuration se fera à cet endroit puisque nous prenons pour acquis que la partie centrale de l'éprouvette est plus susceptible de fissurer. Or, dans plus de 50% des cas, la fissuration s'est produite à l'extérieur de l'emprise des extensomètres, soit vers l'interface casque-éprouvette. De plus, étant donné que nous n'avons pas pris en note quelles éprouvettes à fissurées où, nous ne pouvons nous servir de cette information.

Tableau XVII

Synthèse des résultats de l'essai de la résistance à la fissuration thermique
(Ø60 mm ; 10°C/h)

Mélange	Éprouvette	T_{rupture} (°C)	$\sigma_{rupture}$ (MPa)	T_g (°C)	Pente
EG-10A (10% filler)	1	-31	3,27	-22	-0,23
	2	-30	2,49	-22	-0,17
	3	-30	2,78	-23	-0,20
	moyenne	-30,3	2,85	-22,3	-0,20
	écart-type	0,58	0,39	0,58	0,03
EG-10B (7% filler)	1	-32	4,26	-22	-0,28
	2	-31	3,76	-22	-0,26
	3	-33	4,54	-22	-0,29
	moyenne	-32	4,19	-22	-0,28
	écart-type	1	0,40	0,00	0,02

5.4 La mesure du module complexe

Pour calculer le module complexe à partir d'un essai cyclique sinusoïdal, il y a deux méthodes. La première méthode, désignée méthode ponctuelle, consiste à calculer la norme du module complexe à partir de la déformation maximale et de la contrainte maximale tirée de l'acquisition des données. Pour y arriver, un cycle ou deux sont choisis dans la partie stabilisée de l'essai et les valeurs de la contrainte ou de la déformation sont trouvées en prenant leurs valeurs maximales. Le déphasage est évalué visuellement à partir des relations contrainte-temps et déformation-temps. Cette méthode est laborieuse et manque nettement de précision.

La deuxième méthode, méthode des moindres carrés, consiste à trouver les courbes de régression qui représentent le mieux les points expérimentaux en contrainte et en déformation (figure 5.17). Ces courbes sont établies à l'aide de la méthode des moindres carrés. Avec ces courbes, les amplitudes de la contrainte et de la déformation nécessaire pour calculer le module complexe et l'angle de phase sont plus représentatives du comportement rhéologique du matériau.

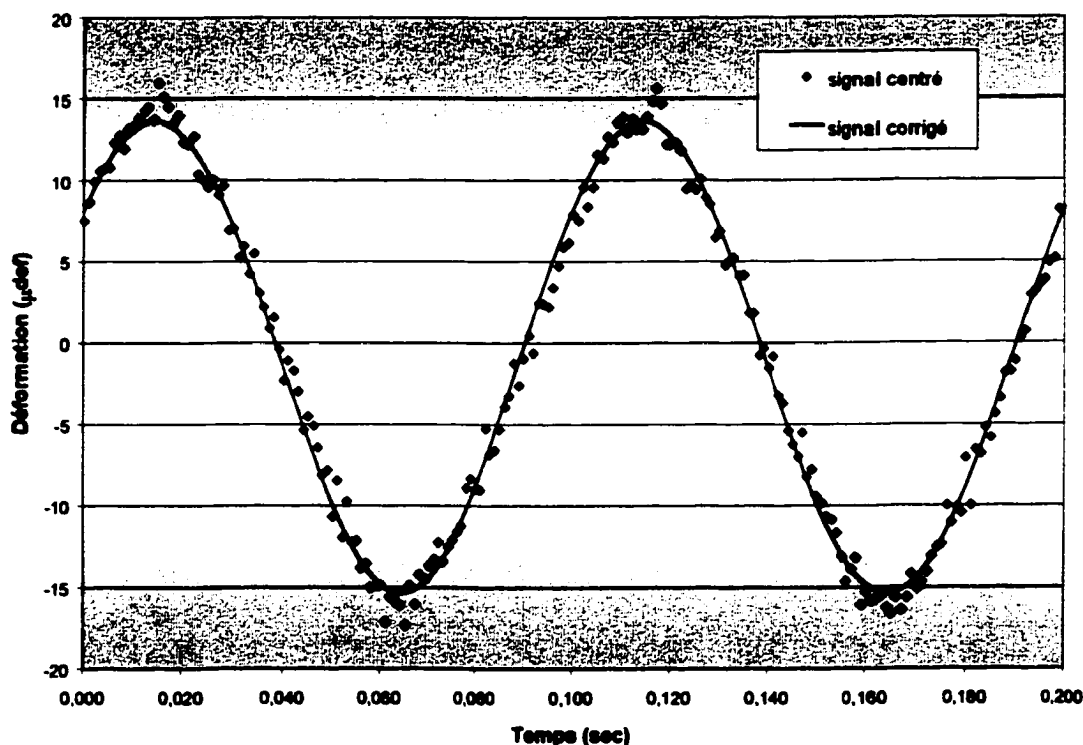


Figure 5.17 :Points expérimentaux et droite de régression, calculée à l'aide de la méthode des moindres carrés, de la déformation lors d'un essai de mesure du module complexe

5.4.1 Résultats des essais de mesure du module complexe

Pour les essais de module complexe, six éprouvettes de 80 mm de diamètre ont été testées. Trois éprouvettes de l'enrobé à EG-10A et trois de l'enrobé EG-10B.

Les essais sur les enrobés EG-10A ont été réalisés en premier. Lors de l'acquisition des données de cette série d'essai, un nombre restreint de point par cycle a été

enregistré. Pour les fréquences supérieures à 5Hz, il y a moins de 20 points par cycle. À cause de ce manque de données, l'application de la courbe de régression à l'aide de la méthode des moindres carrés n'est pas possible. De ce fait, les données de cette première série d'essais ont été analysées de façon approximative (méthode ponctuelle). Avec une telle analyse, il est impossible de calculer un angle de phase précis limitant ainsi l'exploitation des résultats. De plus, lors du montage d'une des éprouvettes dans l'enceinte thermique, une erreur a été commise et l'éprouvette a été brisée. Pour cette raison, seulement deux éprouvettes ont pu être testés.

Les essais de mesure du module complexe effectués sur l'enrobé EG-10B, ont été conduits en augmentant le nombre de point d'acquisition (100 pts/cycle). Les résultats des essais pour les enrobés EG-10A et EG-10B sont présentés dans les figures 5.18 à 5.24 et les valeurs détaillées à l'annexe 7.

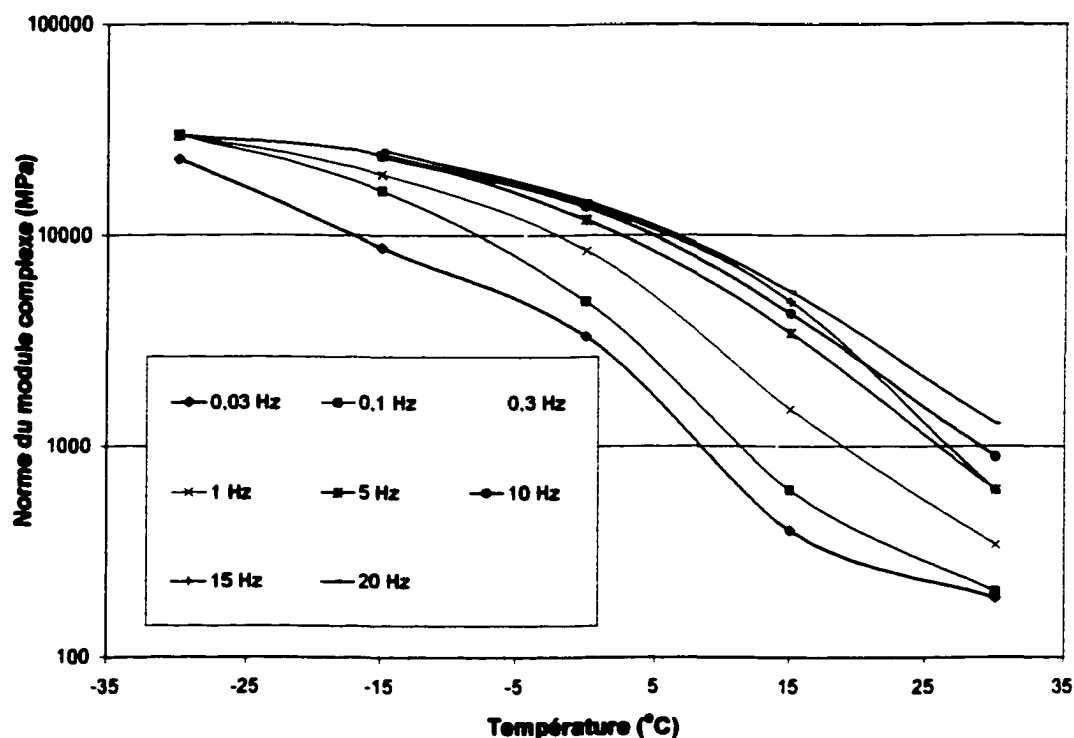


Figure 5.18 : Moyenne des isochrones de la norme du module complexe de l'enrobé EG-10A (10% de filler)

L'allure des courbes isochrones des figures 5.18 et 5.19 est tout à fait usuelle. L'influence de la température sur la norme du module complexe est bien visible sur les figures 5.18 et 5.19. C'est la moyenne des résultats des essais pour chacune des fréquences testées qui est représenté sur les figures 5.18 et 5.19. Sur ces deux figures, il est clair que la fréquence a une influence beaucoup plus marquée à haute température qu'à basse température.

On peut également remarquer sur les figures 5.18 et 5.19 que la norme du module complexe peut augmenter de plus de 10 000% en abaissant la température de 60°C.

Les figures 5.20 et 5.21 montrent le module complexe des enrobés EG-10A et EG-10B dans le plan Cole-Cole. Comme prévu, les points expérimentaux forment une parabole unique indépendamment de la température ou de la fréquence. Ces résultats

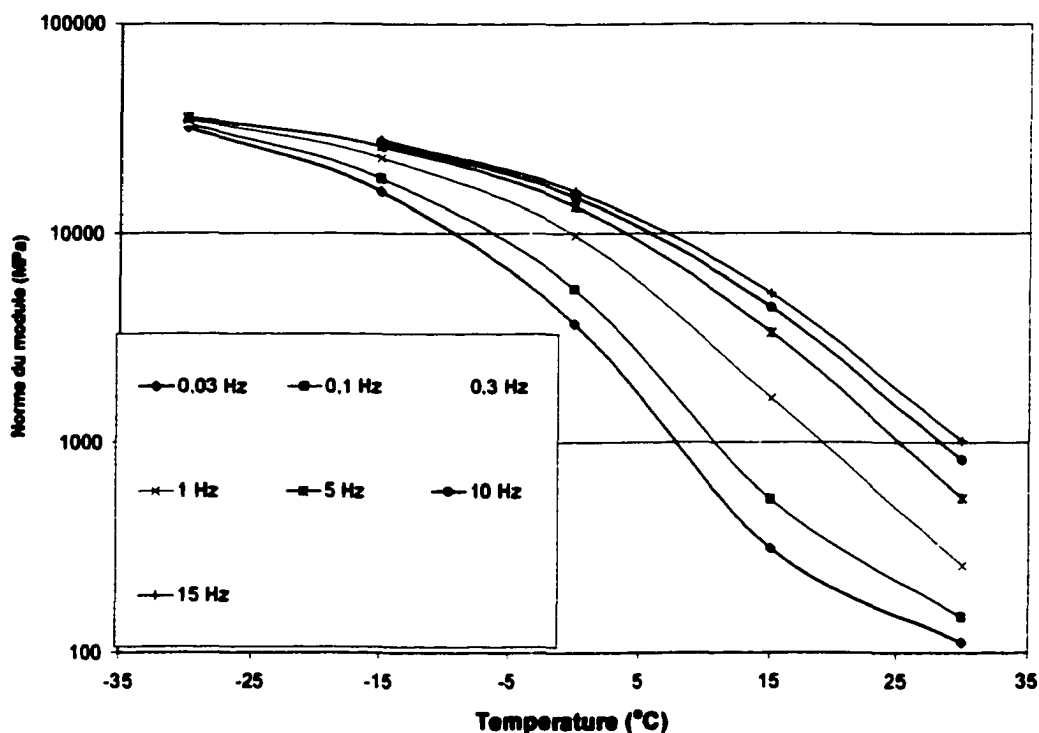


Figure 5.19 : Moyenne des isochrones de la norme du module complexe de l'enrobé EG-10B (7% de filler)

confirment l'applicabilité du concept temps-température pour la construction d'une courbe maîtresse.

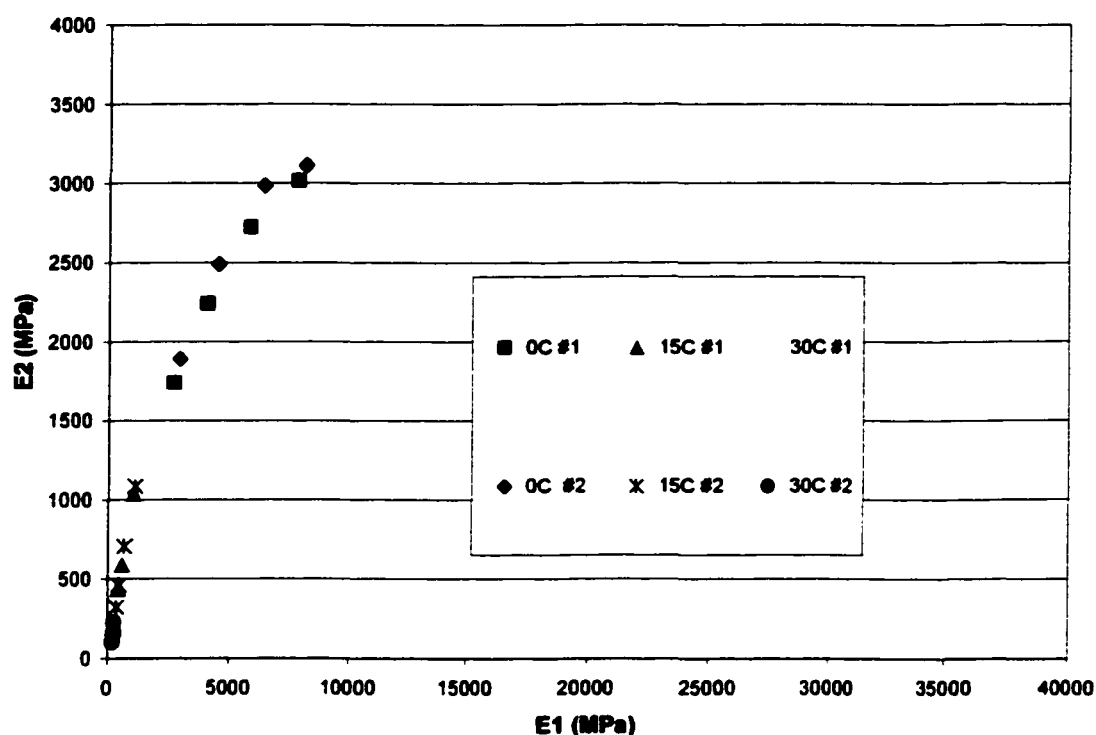


Figure 5.20 :Représentation du module complexe de l'enrobé EG-10A (10% de filler) dans le plan Cole-Cole (2 éprouvettes #1 et #2)

Sur la figure 5.20 (EG-10A), la parabole n'est pas complète, mais l'allure générale de la partie que nous avons semble corroborer la littérature. Pour ce qui est de l'enrobé EG-10B (figure 5.21), la parabole est complète.

Finalement, les résultats de la mesure du module complexe de l'enrobé EG-10B sont présentés dans l'espace de Black dans la figure 5.22. Les résultats des essais des enrobés EG-10A ne sont pas représentés dans l'espace de Black car aucune tendance n'est visible dans ce cas compte tenu de l'imprécision importante attribué à la détermination des angles de phase servant à calculer E_1 et E_2 . À la figure 5.22, il est

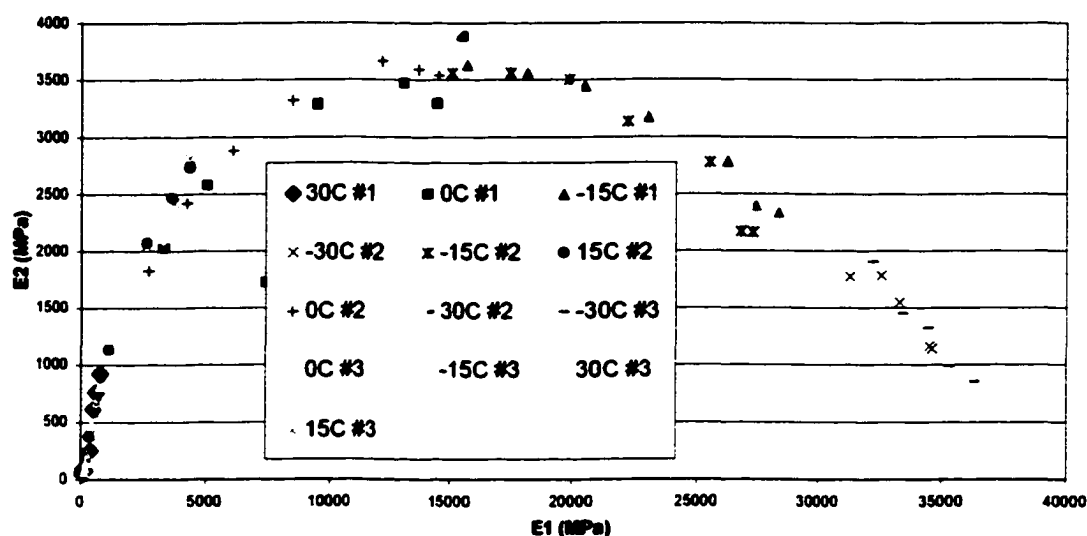


Figure 5.21 : Représentation du module complexe de l'enrobé EG-10B (7% de filler) dans le plan Cole-Cole (3 éprouvettes #1, #2 et #3)

clair que l'angle de phase augmente avec la température jusqu'à à un plateau au delà duquel il redescend. Cette tendance est usuelle pour les enrobés bitumineux.

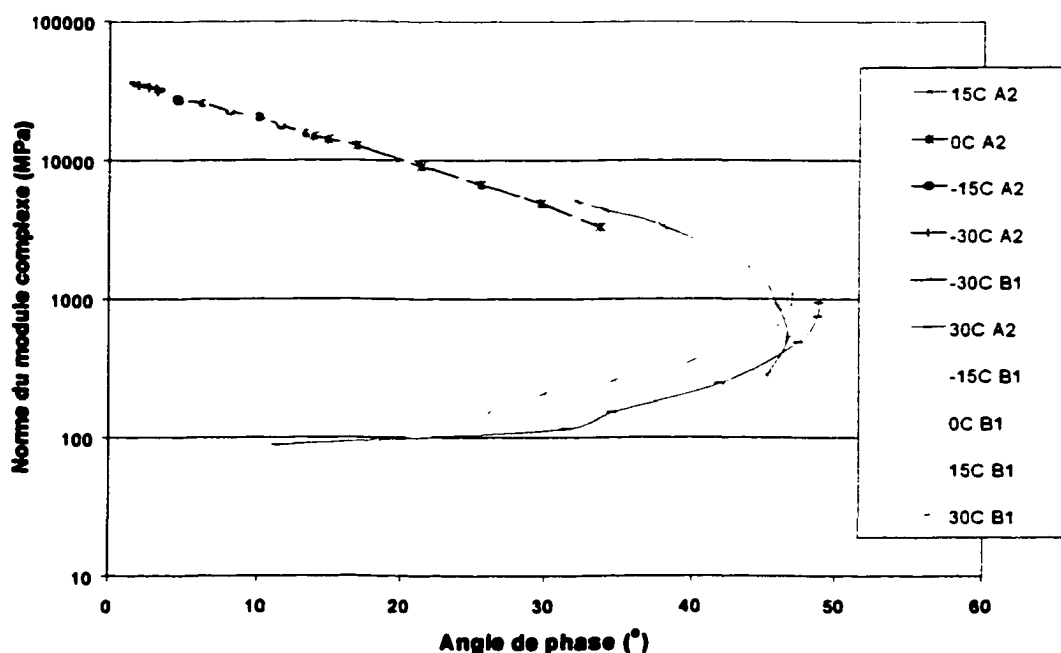


Figure 5.22 : Norme du module complexe en fonction de l'angle de phase dans l'espace de Black pour l'enrobé EG-10B

Pour l'ensemble de ces figures, on peut remarquer que les résultats présentés sont comme ce que nous escomptions et tout à fait comparables avec les résultats présents dans la littérature.

5.5 Les méthodologies

Suite à ces deux essais, deux méthodologies expérimentales ont été écrites pour mesurer le module complexe de l'enrobé bitumineux et sa résistance à basse

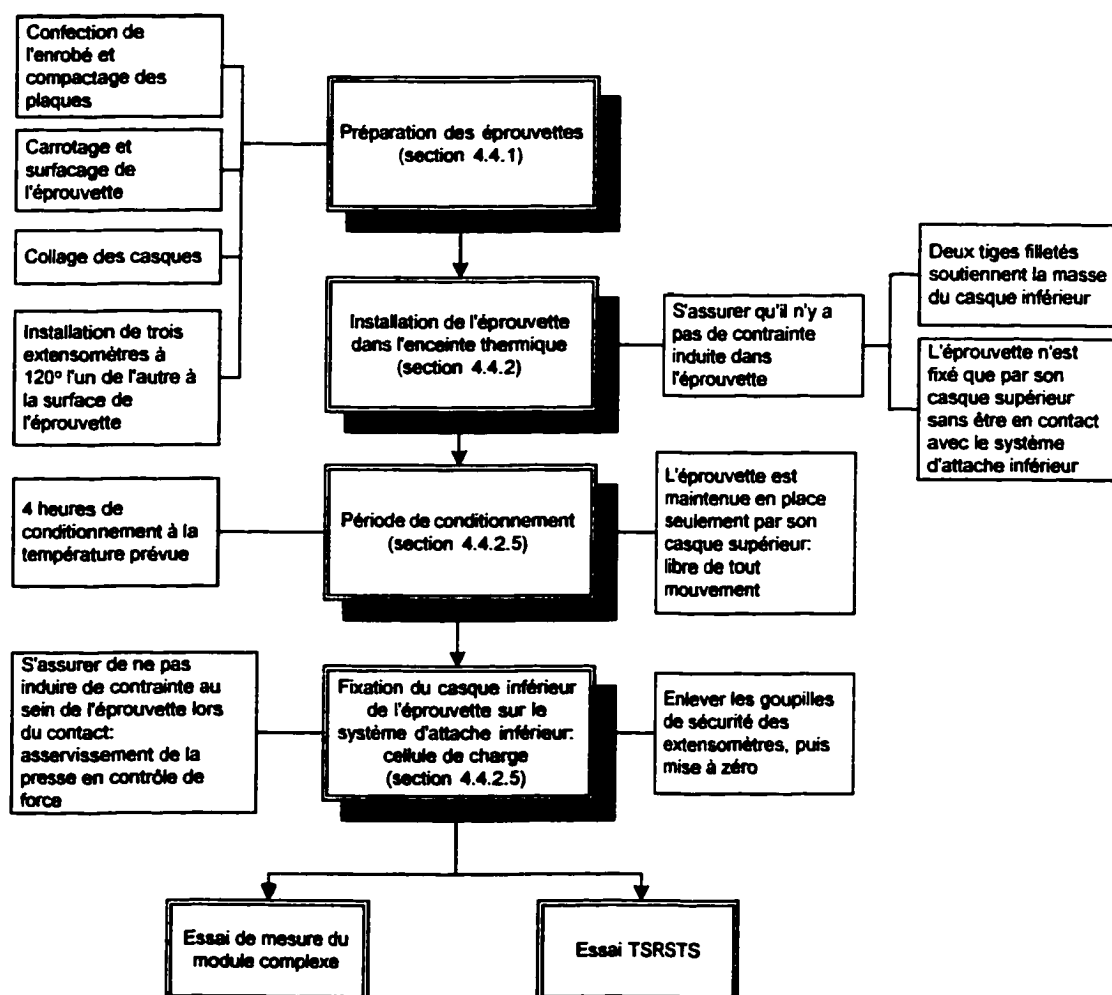


Figure 5.23 : Méthodologie pour la préparation des éprouvettes avant les essais de retrait thermique empêché ou de mesure du module complexe

température à partir de l'essai de TSRSTS. Les figures 5.23, 5.24 et 5.25 montrent les méthodologies sous forme d'organigrammes. Les méthodologies sont détaillées en annexe.

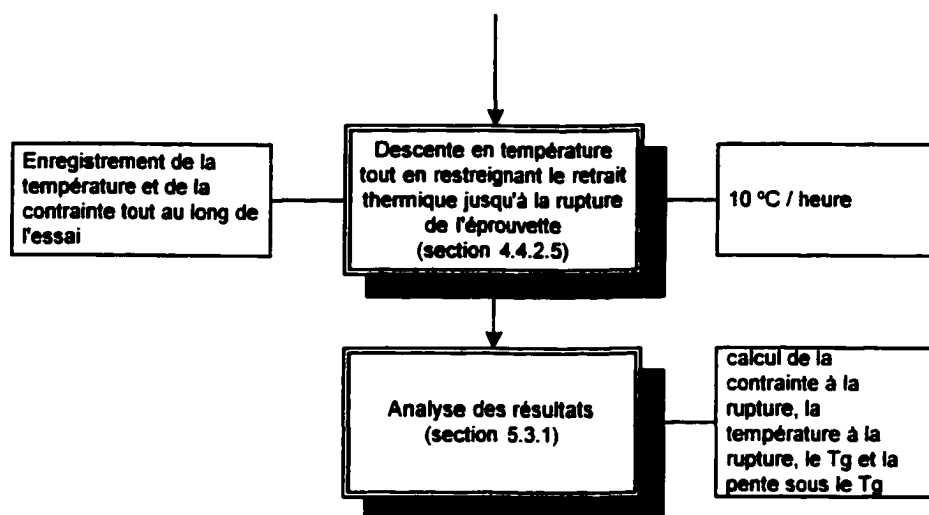


Figure 5.24 : Méthodologie pour l'essai de retrait thermique empêché (TSRSTS)

La température de conditionnement est différente pour ces deux essais. Pour le TSRSTS, la température de conditionnement est de 5°C, tandis que pour l'essai de mesure du module complexe, la température de conditionnement est la même que la température d'essai, soit : -30, -15, 0, 15 ou 30°C. Une fois les éprouvettes confectionnées et mise en place, suivre une des deux méthodologies suivantes.

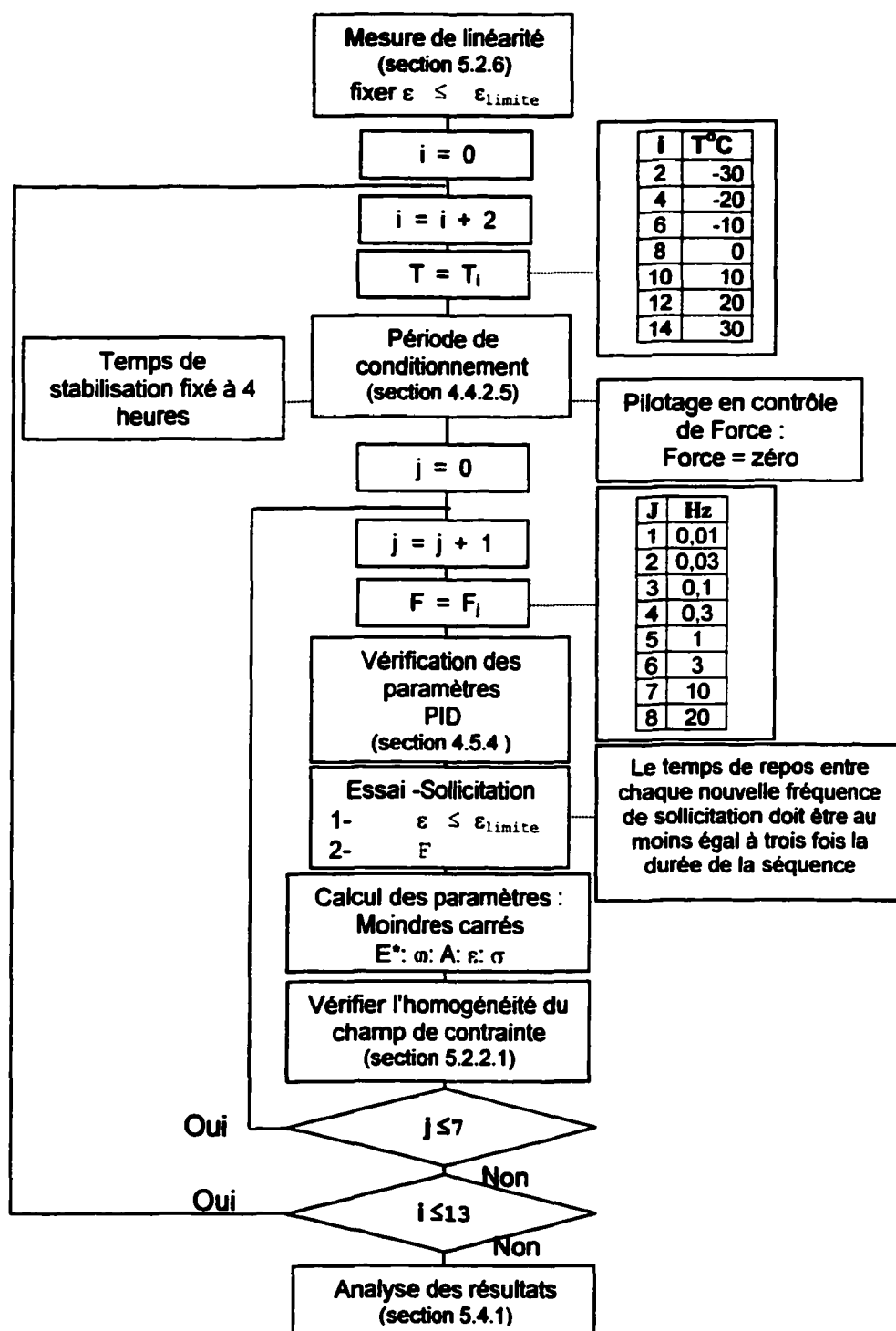


Figure 5.25 : Organigramme de la méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des essais de mesure du module complexe et des essais de retrait thermique empêché sont analysés et comparés avec les résultats de la littérature. Si avec les résultats présentés, il est possible de bien différencier le comportement rhéologique des deux enrobés étudiés, c'est donc que les paramètres des deux essais ont été bien établis.

La première partie de cette analyse porte sur le comportement viscoélastique linéaire des enrobés étudiés. Ensuite vient l'analyse des essais de caractérisation des enrobés bitumineux, soit : les résultats des essais de mesure du module complexe et les résultats des essais de retrait thermique empêché.

6.2 La limite de linéarité du comportement viscoélastique

Comme souligné dans le chapitre V (section 5.2.6), la limite de linéarité du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux testés se situe aux alentours de $30 \mu\text{def}$ pour une température de 40°C . À cette température, un essai effectué à basse fréquence peut facilement sortir du domaine linéaire lorsque la déformation imposée augmente. Étant donné que nos essais sont effectués à de basses fréquences (jusqu'à $0,03\text{Hz}$), il faut impérativement tenir compte de la fréquence la plus critique, soit 1 Hz (voir figures 5.13 et 5.14, section 5.2.6). Évidemment, puisque l'enrobé est un matériau thermoplastique, à des températures inférieures à 40°C , il est possible d'aller au-delà de $30 \mu\text{def}$ tout en restant dans le domaine linéaire. Néanmoins, étant donné que nos essais ont été réalisés à des températures variant de -15°C à 30°C , il a été convenu de limiter la déformation à $30 \mu\text{def}$ pour l'ensemble des essais de manière à faciliter l'exécution des essais et l'analyse des résultats.

La limite de linéarité pour des enrobés français se situe souvent autour de $50 \text{ à } 100 \times 10^{-6}$ ($50 \text{ à } 100 \text{ } \mu\text{def}$) . Il est important de préciser qu'il est usuel de mesurer une perte de linéarité de la norme du module complexe comprise entre de 5% à 30% pour les mesures effectuées suivant une déformation imposée de $100 \text{ } \mu\text{def}$ pour les enrobés bitumineux de formulation française. Cette perte de linéarité est en grande partie due à l'hétérogénéité du matériau et des éprouvettes. Dans notre cas, l'enrobé EG-10A testé atteint le seuil de 30% à une déformation de $70 \text{ } \mu\text{def}$ tandis que l'enrobé EG-10B atteint ce seuil à $100 \text{ } \mu\text{def}$. Les enrobés bitumineux testés ont donc un comportement VEL similaire en celui des enrobés français puisque les résultats de perte de linéarité sont du même ordre de grandeur.

Une perte de linéarité de 30% est une nettement trop grande. La perte doit être aussi faible que possible sans affecter la précision des résultats. En fait, une perte de linéarité de 30% rend à toute fin pratique inapplicable le concept d'équivalence temps-température et limite le traçage des résultats dans le plan Cole-Cole. Une perte de 5 % ou 10% est généralement acceptée.

Les enrobés français de référence sont des enrobés avec un bitume de pénétration 50-70. Le bitume PG 58-28 utilisé dans ce programme expérimental a une pénétration de 120. Le bitume français utilisé comme référence est donc plus rigide. Cette rigidité supérieure n'affecte pas les résultats dans la plage de température et de fréquence testée.

Il est nécessaire de faire une série d'essai pour évaluer la limite de linéarité pour chaque nouvel enrobé dont on souhaite évaluer l'évolution de son module complexe. Dépendamment du type d'enrobé bitumineux testé, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer un plus grand nombre d'essai, pour avoir une meilleure idée de la limite de linéarité, soit en balayant un plus grand nombre de fréquences et de températures. Pour notre cas, les essais effectués ont bien couvert la limite de linéarité et il n'aurait pas été nécessaire de faire des essais supplémentaires.

6.2.1 Comparaison entre les deux enrobés

En comparant les résultats des essais de mesure de la perte de linéarité en fonction de la grandeur de la déformation imposée (section 5.2.6, figures 5.13 et 5.14), on remarque qu'il n'y a pas de grande différence pour l'enrobé EG-10A qui contient 10% de filler et l'enrobé EG-10B qui contient 7% de filler. On peut donc admettre que la limite de linéarité est à toute fin pratique la même pour les deux enrobés testés : EG-10A et EG-10B.

6.3 Les essais de caractérisation des enrobés bitumineux

Dans les essais de caractérisation des enrobés qui sont analysés dans cette section, il y a la résistance à la fissuration thermique évaluée à partir de l'essai TSRSTS et le comportement rhéologique à petites déformations de l'enrobé évalué par la mesure de ses modules complexes.

6.3.1 La résistance à la fissuration thermique

Pour le calcul de la contrainte de rupture de l'essai de retrait thermique empêché, l'aire de l'éprouvette a été mesurée à partir de la mesure de son diamètre avec une précision de $\pm 1\text{mm}$. Même si le vernier utilisé pour faire cette mesure à une précision de $\pm 0,03\text{mm}$, l'hétérogénéité du diamètre de l'éprouvette augmente l'incertitude de la mesure. Cette incertitude sur l'aire de l'éprouvette est évaluée à $\pm 93\text{ mm}^2$ soit, une incertitude relative de 3,5% (voir annexe 4).

Il est clair qu'on peut réduire cette incertitude en déterminant le diamètre des éprouvettes à l'endroit du plan de la rupture aussitôt l'essai terminé. En mesurant le diamètre au plan de rupture, la contrainte de rupture sera plus précise puisque le diamètre réel sera utilisé pour le calcul. Lors d'un essai de TSRSTS, la dilatation longitudinale est empêchée, mais pas la dilatation diamétrale. De ce fait, il est normal que l'aire de l'éprouvette change en cours d'essai. Il est à noter, que dans le cas où la mesure de ce diamètre est prise une fois que la température de l'éprouvette est

revenue autour de 22°C, le diamètre de l'éprouvette aura changé à cause de la dilatation thermique du matériau. Pour une éprouvette de $\phi 60\text{mm}$ dont la rupture s'est produite à -32°C et qui revient à température ambiante (22°C), l'augmentation de diamètre sera de l'ordre de 0,08mm si un coefficient de dilatation thermique de $25 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ est utilisé. Étant donné que ce changement de dimension est plus grand que la précision du vernier, on doit en tenir compte.

6.3.1.1 Comparaison des deux enrobés

La figure 6.1 montre la différence entre les résultats des deux enrobés pour les essais de retrait thermique empêché. Les résultats sont clairs puisque, en dépit du fait que les enrobés EG-10A et EG-10B ont été confectionnés à partir du même bitume, leur résistance à la fissuration à basse température se distingue à partir de l'essai de TSRSTS. La figure 6.1a montre que la température moyenne de la rupture des éprouvettes EG-10A contenant 10% de filler (-30,3 °C) est inférieure, en absolue, à celle de l'enrobé EG-10B, contenant 7% de filler (-32,0 °C). Il est à noter que les températures de ruptures correspondent à un PG XX-28.

La figure 6.1b indique également que la contrainte moyenne de rupture de l'enrobé EG-10A (2,8 MPa) est plus faible que celle de l'enrobé EG-10B (4,2 MPa). C'est donc dire que la surdose de filler a pour conséquence de changer la résistance à basse température de l'enrobé.

Le rôle du filler sur la résistance à basse température évaluée à partir du TSRSTS
- Tel que souligné au chapitre I (section 1.3.5.3.2), le facteur qui influence le plus la résistance à la fissuration thermique est le type de bitume utilisé. Étant donné que les deux enrobés ont été confectionnés avec le même bitume, il est tout à fait réaliste de penser que leur comportement à basse température soit similaire. Or, les résultats montrent des différences (tableau XVII).

Les deux enrobés testés sont différents de part leur compacité, la présence ou non de sable naturel et leur quantité de fillers. L'enrobé EG-10A a plus de vides (1,2% de plus)

que l'enrobé EG-10B à 80 girations à la PCG. Selon la revue de la documentation (section 1.3.5.3.2), un enrobé avec plus de vides aura tendance à se fissurer à une température plus basse au TSRSTS. Or, nos résultats vont dans le sens opposé puisque l'enrobé EG-10B présente une meilleure performance au TSRTSTS que l'enrobé EG-10A (T_{rupture} plus basse et une contrainte de rupture nettement plus haute; voir tableau XVII). C'est donc dire qu'un autre paramètre joue un rôle déterminant à ce niveau.

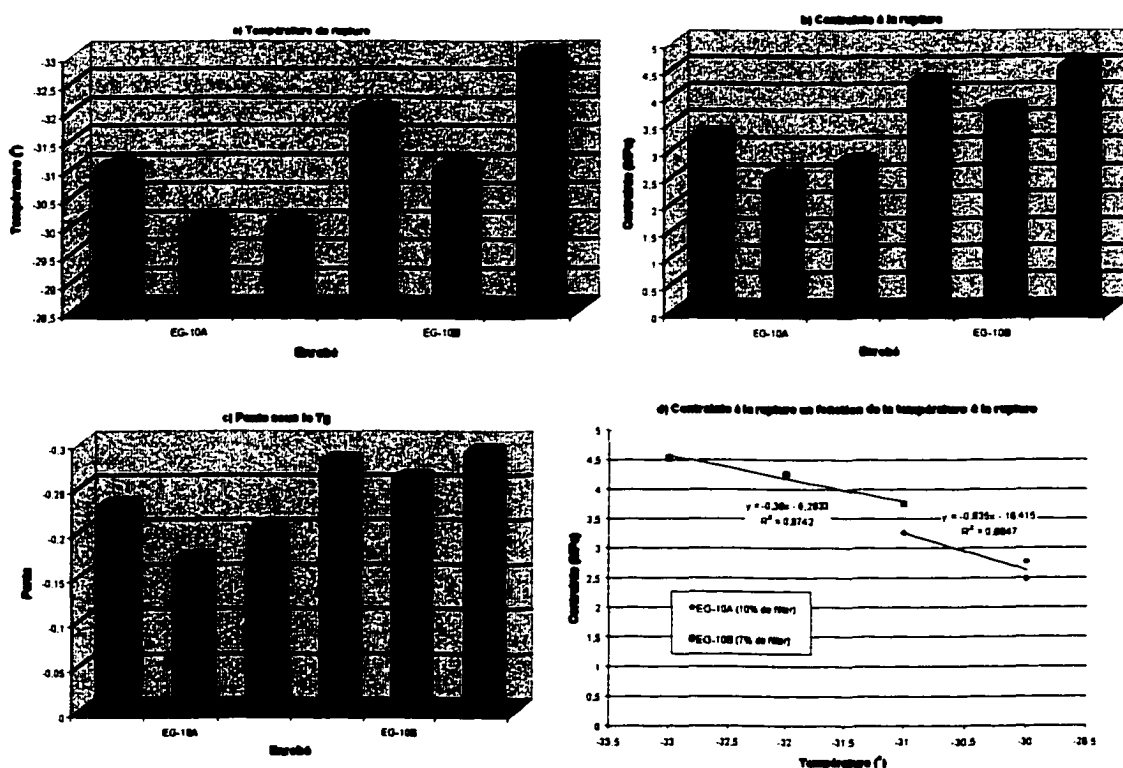


Figure 6.1 : Comparaison des résultats des essais de retrait thermique empêché pour les enrobés EG-10A et EG-10B

Toujours selon la littérature, la granularité et le filler n'ont pas, semble-t-il, d'influence significative sur les résultats au TSRSTS. Cependant, il est admis (section 1.3.5.3.2) que l'absorption des granulats peut influencer la température ou la contrainte de rupture au TSRSTS en jouant sur l'épaisseur du film de bitume effectif. À notre avis, c'est

justement à ce niveau que l'on peut chercher à comprendre la différence de comportement à basse température entre les enrobés EG-10A et EG-10B. En effet, l'augmentation de la teneur en filler a un impact direct sur l'épaisseur du film de bitume effectif, le FBE, en modifiant notamment l'absorption du bitume par le granulat. D'autre part, la présence du filler modifie en quelque sorte la composition du bitume libre (bitume compris entre les particules du filler dans le mastic). En effet, la présence d'un filler a pour effet de rigidifier le bitume (Young et coll 1998). La grande surface spécifique du filler, d'autant plus significative que le dosage est important, interfère sur la fraction du maltène par un effet d'adsorption.

Le tableau XVIII montre clairement que le film de bitume effectif (FBE) et le film de mastic effectif (FME) des enrobés EG-10A et EG-10B sont très différents. Ce sont des éléments importants dont il n'est pas question dans la littérature. En ayant un FBE plus grand, l'enrobé EG-10B, a plus de bitume qui participe à la résistance en traction de l'enrobé tout en procurant une plus grande souplesse (bitume libre moins rigide pare que moins de filler). L'influence du FBE et du FME devrait donc faire l'objet de recherche subséquente.

Tableau XVIII

Comparaison du FBE et du FME des enrobés EG-10A et EG-10B

	% de filler	FBE (μm)	FME (μm)
EG-10A	10,2	6,6	349,5
EG-10B	7,2	8,2	200,0

La susceptibilité thermique des enrobés testés – On peut avoir une idée de la susceptibilité thermique de l'enrobé à partir de la pente de la relation contrainte-température pour des température en deçà de la température de transition vitreuse, T_g . Les résultats présentés à la figure 6.1c indiquent que la susceptibilité thermique (la pente) de l'enrobé EG-10A (-0,20) est moindre que celle de l'enrobé EG-10B (-0,28).

En définitive, bien qu'un ajout de filler se traduise par une baisse de résistance à basse température de l'enrobé, il semble néanmoins que cet ajout donne lieu à un matériau ayant une moindre susceptibilité thermique.

Du fait que la performance à basse température de l'enrobé dans la chaussée est liée à l'effet combiné d'un couplage thermomécanique à l'action mécanique liée aux charges, la seule mesure de la performance au TSRSTS ne permet pas d'anticiper la performance sur route puisque l'essai donne une information sur le couplage thermomécanique seulement. Il faut chercher à préciser l'évolution de la résistance à la traction aux basses températures des enrobés testés au TSRSTS. Un essai de traction directe à basse température permettrait d'apporter certaines précisions quant à l'évolution de la résistance mécanique des enrobés bitumineux testés.

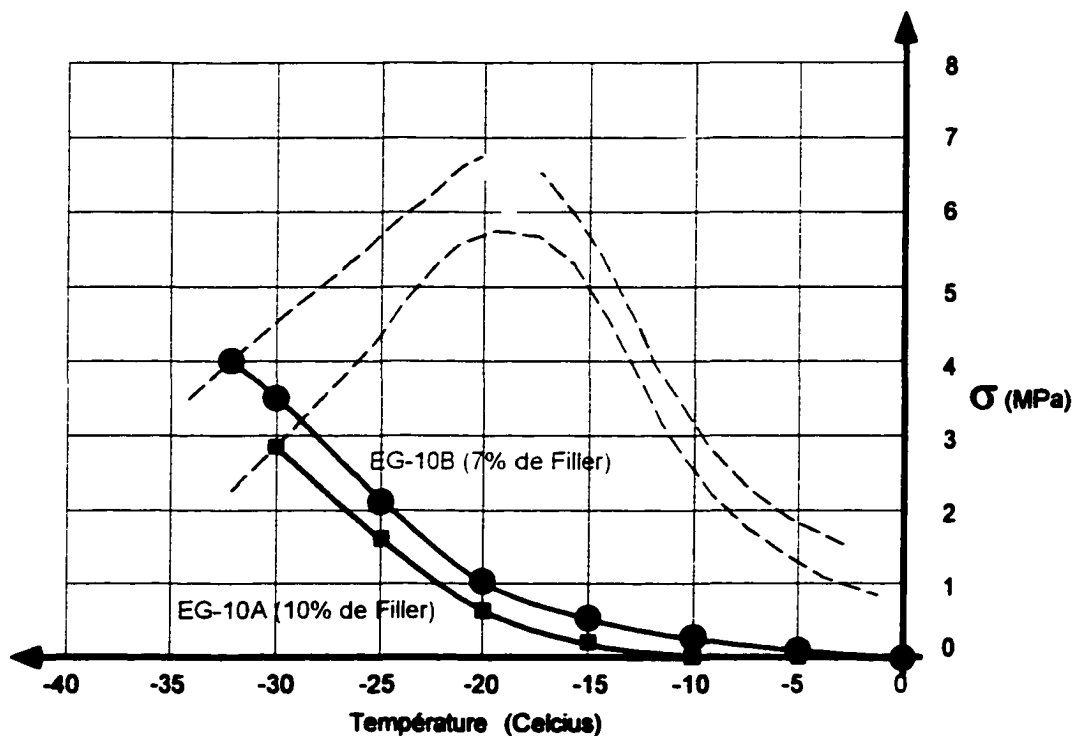


Figure 6.2 : Courbes résultats des essais TSRSTS des enrobés EG-10A et EG-10B et courbe probable des résultats d'essai en traction directe selon la température

Sur la figure 6.2, on peut voir de quoi aurait l'air les courbes de résistance en traction directe en fonction de la température. Il y a rupture de l'éprouvette lors d'un essai de TSRSTS lorsque les courbes se croisent.

6.3.1.2 Comparaison avec les résultats de la littérature

Il est assez complexe de faire une comparaison directe entre nos résultats et les résultats présentés dans la littérature à cause de la nomenclature utilisée pour caractériser les bitumes utilisés. Dans l'étude de Jung et Vinson (1994), des bitumes ayant une pénétration entre 50 et 150 ont été utilisés. Étant donné qu'un PG 58-28 a habituellement une pénétration autour de 120, nous croyons que nos résultats devraient être comparables avec les leurs.

Les températures à la rupture de Jung et Vinson se trouvent entre $-16,6^{\circ}\text{C}$ et $-32,6^{\circ}\text{C}$. Les deux enrobés que nous avons testés EG-10A et EG-10B, ont respectivement des températures à la rupture de $-30,3^{\circ}\text{C}$ et $-32,0^{\circ}\text{C}$; ce qui est comparable. Pour la température de transition vitreuse, il en va de même. Jung et Vinson ont obtenu des températures oscillant entre $-9,1^{\circ}\text{C}$ et $-23,0^{\circ}\text{C}$ et nous avons trouvé des valeurs de $-22,3^{\circ}\text{C}$ et $-22,0^{\circ}\text{C}$. Comme pour la température de rupture, nous avons obtenu des valeurs à la limite des valeurs de Jung et Vinson. Nous considérons que c'est tout à fait normal puisqu'au Québec, on utilise habituellement des bitumes plus mous dans les enrobés.

En ce qui concerne la contrainte à la rupture, nos valeurs sont encore une fois dans le même ordre de grandeur que celles de Jung et Vinson. Nous avons des valeurs moyennes de 2,9 MPa et de 4,2 MPa, et Jung et Vinson ont obtenu des contraintes entre 1,5 MPa et 4,0 MPa. Finalement, la pente de la relation contrainte-température en deçà du T_g est le dernier point de comparaison. Nous avons des pentes moyennes de 0,20 et 0,28 et Jung et Vinson ont obtenu des pentes variant de 0,15 à 0,27.

Dans l'ensemble, nos résultats sont dans l'ordre de grandeur de ceux présentés dans la littérature pour une classe de bitume comparable (péné. 100/120). Cette

constatation valide en quelque sorte la méthodologie proposée à la section 5.5 pour mesurer la résistance à basse température des enrobés bitumineux à partir d'un essai au TSRSTS.

6.3.2 Le module complexe

Avant d'analyser les résultats obtenus pour la mesure des modules complexe, il convient d'apporter certaines précisions quant à l'importance de l'acquisition de donnée.

6.3.2.1 Acquisition des données

Comme expliqué dans le chapitre V (section 5.4), le calcul du module complexe a été fait à partir de deux méthodes : 1) méthode ponctuelle et 2) méthode des moindres carrés. Il est à noter que les modules calculés à partir de la méthode ponctuelle sont toujours inférieurs à ceux calculés à l'aide de la méthode des moindres carrés pour une même éprouvette. À titre d'exemple, la norme du module complexe calculée à partir de la méthode ponctuelle pour l'enrobé EG-10B (à 15°C et 10 Hz) est de 4132 MPa alors qu'elle est évalué à 4411 MPa par la méthode des moindres carrés (écart de 6,7%). Toujours pour la même éprouvette, l'angle de phase évalué à partir de la méthode des moindres carrés est de 34° tandis qu'il est de 22° lorsque estimé avec la méthode ponctuelle (écart de 54,5%).

Le tableau XIX montre l'évolution de l'écart entre la norme du module complexe établie à l'aide de la méthode des moindres carrés et la norme du module complexe établie en utilisant la méthode ponctuelle pour diverses fréquences de sollicitation. On constate que d'un part l'écart augmente considérablement avec l'augmentation de la fréquence de sollicitation et que, d'autre part, les écarts sont plus grands pour l'angle de phase que sur la valeur de la norme du module complexe.

Tableau XIX

Écart entre les valeurs de la norme du module complexe calculées à l'aide de la méthode des moindres carrés et des valeurs de la norme du module complexe calculées à partir de valeurs ponctuelles maximales tirées de l'acquisition des données pour un même essai

Fréquence d'essai	Écart sur la valeur du module	Écart sur la valeur du déphasage
	$\frac{E^*_{\text{moindre carré}} - E^*_{\text{ponctuelle}}}{E^*_{\text{moindre carré}}}$	$\frac{\Phi_{\text{moindre carré}} - \Phi_{\text{ponctuelle}}}{\Phi_{\text{moindre carré}}}$
1 Hz	2,4%	37%
5 Hz	11,0%	41%
15 Hz	50,5%	63%

Le calcul du module complexe à partir de la méthode ponctuelle peut donc conduire à une estimation erronée du module complexe; une erreur d'estimation pouvant atteindre 50%. La méthode ponctuelle est donc totalement inappropriée.

Par ailleurs, le calcul du module complexe à partir des amplitudes maximales de la contrainte et de la déformation (ε_0 et σ_0) et de l'angle de phase établis sur la base d'une courbe de régression sinusoïdale extrapolée à partir des données expérimentales par la méthode des moindres carrés est plus appropriée. Cependant, Il faut suffisamment de points expérimentaux pour pouvoir tracer correctement la courbe du signal corrigé. Selon Soltani (1998), une centaine de points par cycle est nécessaire. En cours d'essais, la contrainte et la déformation doivent donc être enregistrées selon une fréquence d'acquisition de 100 points par cycle de sollicitation.

À la lumière de ces résultats, les valeurs des modules et des angles de phase doivent être impérativement déterminées à l'aide d'une fonction de régression (sinusoïdale en l'occurrence) établie par la méthode des moindres carrés.

6.3.2.2 Comparaison entre les deux enrobés testés

Du point de vue de leur formulation, les deux enrobés étudiés, EG-10A et EG-10B, ne sont différents que par leur teneur en filler. Tel qu'évoqué à la section 1.2.6.2, un enrobé avec une plus grande teneur en filler présente une rigidité plus grande. La norme du module complexe que nous avons mesurée représente la rigidité. Or, les résultats obtenus indiquent que la différentielle de rigidité entre l'enrobé EG-10A (10% de filler) et l'enrobé EG-10B (7% de filler) varie en fonction de la température. La figure 6.3 montre l'écart relatif entre les valeurs de la norme du module complexe de l'enrobé EG-10A et de l'enrobé EG-10B en fonction de la température. Un pourcentage positif signifie que la rigidité de l'enrobé EG-10A est supérieure à celle de l'enrobé EG-10B.

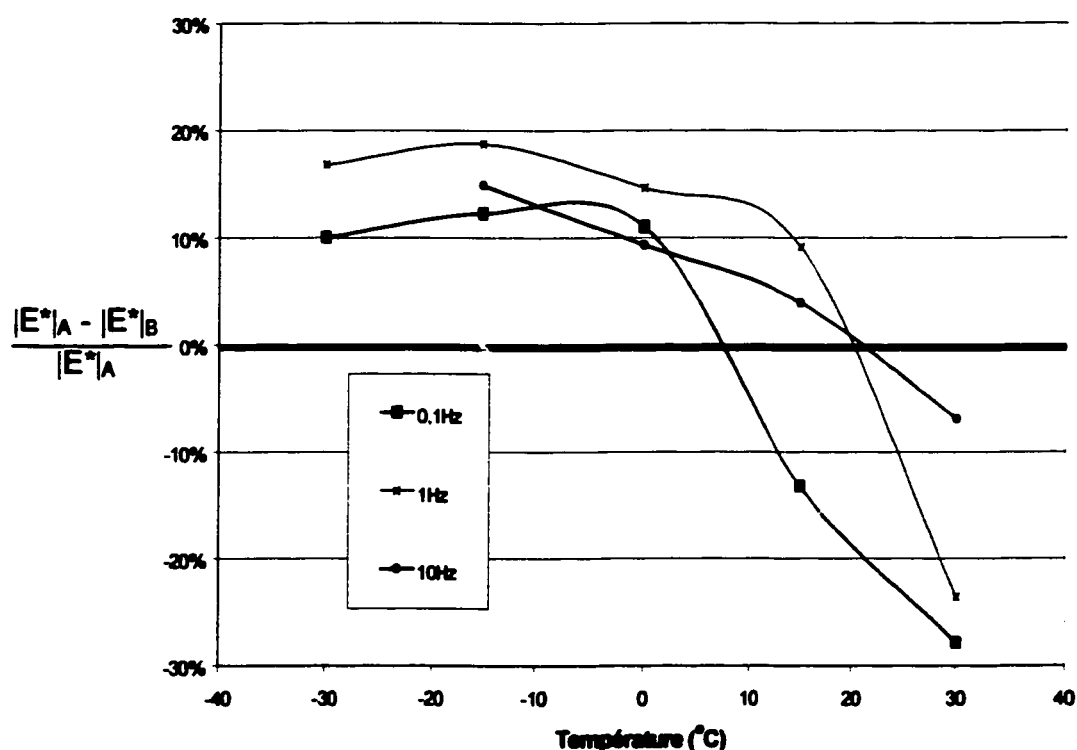


Figure 6.3 : Écart relatif entre la norme du module complexe de l'enrobé EG-10A et celle de l'enrobé EG-10B selon la fréquence en fonction de la température

Exception faite des résultats à 30°C pour lesquels l'incertitude de mesure est très grande, les résultats obtenus sont donc comparables avec ceux présentés dans la littérature.

À 30°C, l'enrobé EG-10A devrait présenter une plus grande cohésion que l'enrobé EG-10B puisqu'une augmentation du dosage en filler se traduit par une plus grande adsorption du bitume augmentant ainsi la cohésion du bitume libre. C'est l'imprécision des résultats des essais effectués sur l'enrobé EG-10A qui fait en sorte que l'enrobé EG-10B présente une plus grande rigidité à 30°C. Des essais complémentaires permettraient d'apporter des précisions à ce sujet.

Entre 0°C et -15°C, les résultats montrent que la norme du module complexe de l'enrobé ayant la plus grande teneur en filler (EG-10A 10% de filler) devient l'enrobé le plus rigide. Toujours sur la figure 6.3, il apparaît que peu importe la fréquence, la différence de la norme du module complexe suit la même tendance générale en fonction de la température. Les résultats mettent clairement en évidence le rôle du filler sur la cohésion de l'enrobé. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus au TSRSTS. C'est donc dire que les modules complexes évalués à basse température pourrait être corrélés à l'essai de TSRSTS. À -30°C, c'est à 0,03 Hz que l'écart est minimal tandis qu'à 30°C, il est maximal à 0,03Hz. De plus, à -30°C, les écarts vont de 0 à 20%, tandis qu'à 30°C, ils vont de 0 à 40%. Nous attribuons, encore une fois, ces incohérences au manque de précision dans le calcul de la norme du module complexe pour l'enrobé EG-10A.

6.3.2.3 Les courbes maîtresses

Les essais de mesure du module complexe des deux enrobés bitumineux étudiés (EG-10A et EG-10B) ont été effectués dans le but de décrire leurs comportements rhéologiques. Tracer des courbes maîtresses à l'aide du principe d'équivalence temps-température est un bon moyen de visualiser leurs comportements rhéologiques pour une température donnée. Les figures 6.4 et 6.5 montrent les courbes maîtresse des enrobés EG-10A et EG-10B à 15°C.

En comparant les figures 6.4 et 6.5, il est clair qu'une acquisition de données plus complète pour les essais de l'enrobé EG-10A (figure 6.4), tel que réalisé dans le cadre des essais pour l'enrobé EG-10B (figure 6.4), aurait permis de tracer avec précision la courbe maîtresse du matériau.

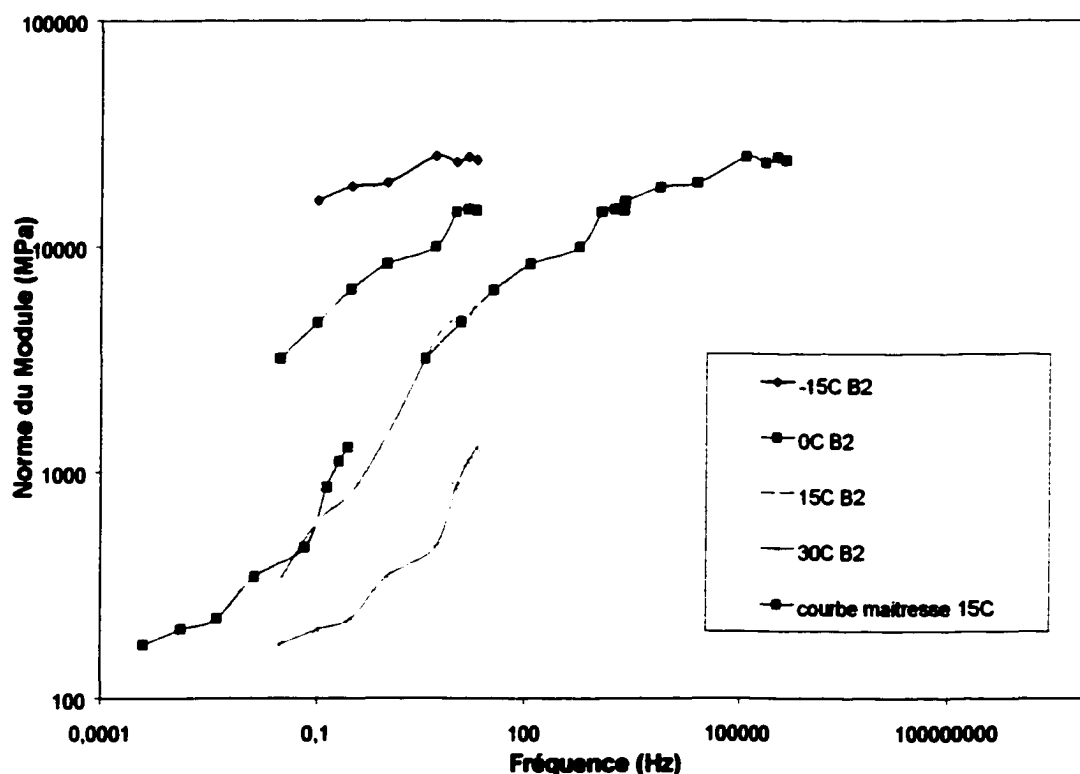


Figure 6.4 : Courbes isothermes et courbe maîtresse à 15°C pour l'enrobé EG-10A (10% de filler)

En dépit de l'imprécision des valeurs pour l'enrobé EG-10A, globalement, l'allure générale des deux courbes est assez semblable (figure 6.6). À haute fréquence (>100000 Hz), le module ne change presque plus en fonction de la fréquence. C'est tout à fait normal, puisque ces valeurs proviennent des essais effectués à basse température (< -15°C) pour qui la fréquence n'a pas beaucoup d'influence. Selon Anderson et coll (1992), à très haute fréquence, les enrobés ont un comportement

purement élastique et le module est plus ou moins semblable pour la plupart des enrobés.

Il est intéressant de constater jusqu'à quel point la norme du module complexe des enrobés change selon la fréquence. Sur la figure 6.5, la courbe maîtresse du comportement rhéologique à 15°C de l'enrobé EG-10B, le module correspondant à la plus basse fréquence (0,001 Hz) est de l'ordre de 100 MPa. La valeur du module établi à basse fréquence fournit les propriétés rhéologiques de l'enrobé en condition statique, comparable à l'action d'une charge constante, comme dans le cas d'une voiture qui est stationnée. Par opposition, à très haute fréquence ($1,1 \cdot 10^9$ Hz) on obtient les caractéristiques de l'enrobé dans le cas d'un impact, comparable à un choc. La figure 6.5 indique que le module augmente de près de 400 fois à haute fréquence de

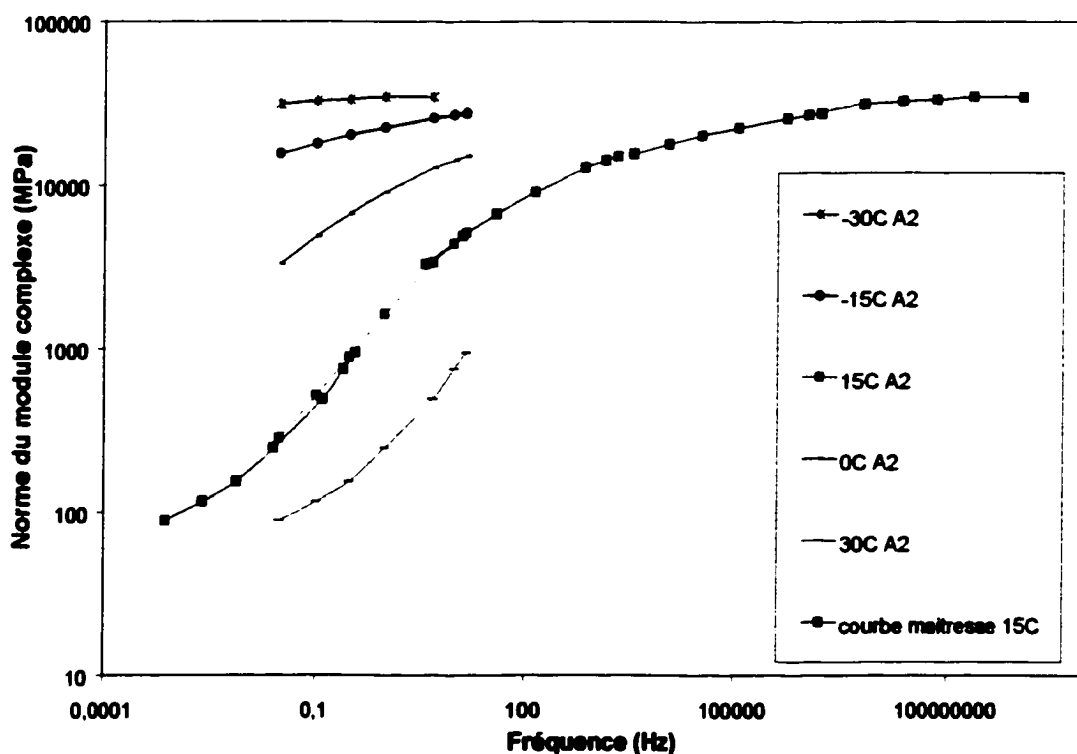


Figure 6.5 : Courbes isothermes et courbe maîtresse à 15°C pour l'enrobé EG-10B (7% de filler)

sollicitation; ceci confirme encore une fois que la fréquence utilisée lors des essais de mesure du module complexe doit être bien contrôlée.

Superposition des courbes maîtresses des enrobés EG-10A et EG-10B - À la figure 6.6, on présente la superposition des deux courbes maîtresses obtenues pour les enrobés EG-10A et EG-10B. La superposition de ces deux courbes montre que les deux enrobés testés ont un comportement rhéologique à 15°C semblable. Les courbes se dissocient à basse fréquence, mais il est noté que la partie à basse fréquence des courbes maîtresse est bâtie avec les valeurs imprécises des essais de module à haute température.

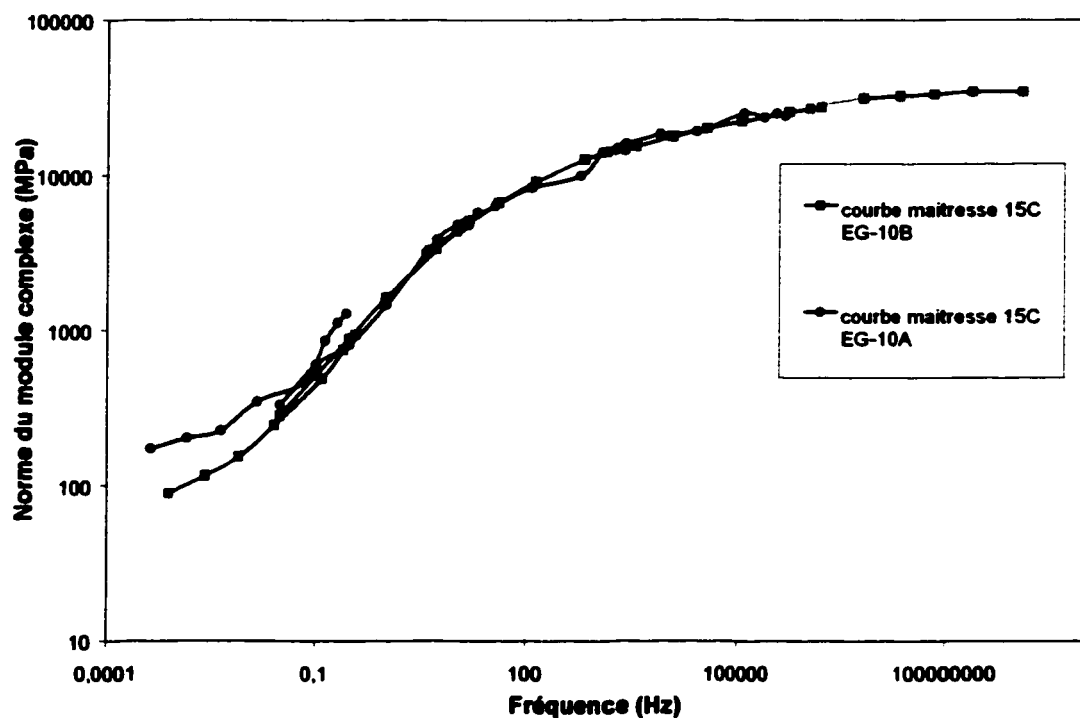


Figure 6.6 : Superposition des courbes maîtresse des enrobés EG-10A et EG-10B à 15°C

Les facteurs de translation - Comme expliqué à la section 1.2.4.4, la relation WLF est utilisée afin d'effectuer les translations des courbes en conditions isothermes de manière à tracer les courbes maîtresses. L'évolution des facteurs de translation, a_T , pour les deux enrobés, en fonction de la température est montrée à la figure 6.7.

On remarque d'abord que les facteurs prennent une valeur unitaire à 15°C ce qui est normal. On peut ensuite remarquer que les facteurs de translation sont très semblables pour les deux enrobés (EG-10A et EG-10B). Plusieurs auteurs ont observés une équivalence des facteurs de translation des enrobés bitumineux et cherchent actuellement à préciser une relation universelle (Di Benedetto et De la Roche, 1988)

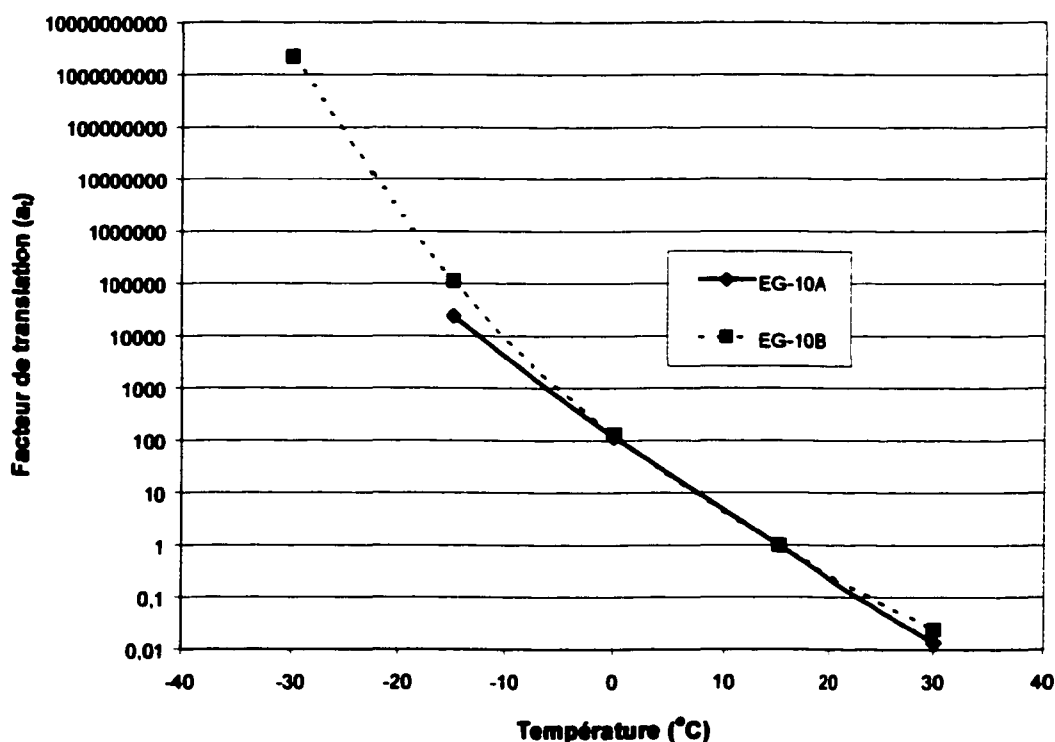


Figure 6.7 : Facteur de translation utilisé pour la construction des courbes maîtresses des enrobés EG-10A et EG-10B

6.4 Modèle permettant de décrire la rhéologie de l'enrobé

À partir du diagramme de Cole-Cole, on peut établir le modèle rhéologique d'un enrobé et l'expression analytique de son module complexe (Cornil, 1968). L'expression analytique présente un intérêt certain tant du point de vue fondamental que pratique. En effet, par le biais de l'informatique, une telle expression permet de calculer facilement la norme du module complexe pour l'ensemble des couples de valeurs température-fréquence. La connaissance de cette expression permet également de prévoir la performance de l'enrobé pour d'autres types d'essais (fatigue, relaxation, etc.) dans la mesure où les conditions d'essai se limitent au comportement linéaire (Cornil, 1968).

La description du comportement rhéologique de l'enrobé à partir de la représentation des résultats dans le plan Cole-Cole permet de simplifier la recherche d'une expression analytique du fait du principe d'équivalence temps-température.

Comme souligné précédemment (figures 5.20 et 5.21), la forme de la relation entre E_1 et E_2 se présente suivant un arc de cercle. Or, Huet-Sayegh ont développé un modèle permettant une représentation juste de cette forme particulière. C'est donc à partir de l'expression analytique du modèle de Huet-Sayegh qu'il convient d'adapter nos résultats. Dans cette perspective, une brève description de ce modèle s'avère nécessaire.

Le modèle de Huet-Sayegh est l'assemblage en parallèle d'un groupe en série d'un ressort de raideur infini, E_{infini} , (valeur vers laquelle tend la partie réelle E_1 de $E^*(\omega\tau)$ lorsque ω tend vers l'infini : soit ni plus ni moins le module instantané) avec deux amortisseurs à fluage parabolique et d'un groupe constitué d'un seul ressort de raideur E_0 (le module statique). La figure 6.8 présente une représentation schématique du modèle de Huet-Sayegh.

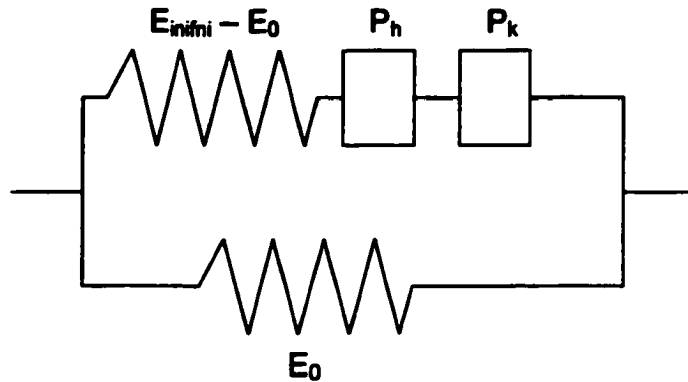


Figure 6.8 : Représentation schématique du modèle de Huet-Sayegh

L'expression analytique du modèle de Huet-Sayegh se définit comme suit :

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_{\text{infini}} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (\text{Éq. 6.1})$$

où:

$$k = \frac{2\alpha}{\pi} \quad \text{et} \quad h = \frac{2\beta}{\pi}$$

Le paramètre α représente l'angle que forme la tangente de la courbe (E_1, E_2) en E_{infini} avec l'axe E_1 alors que le paramètre β est l'arc de la tangente de la courbe (E_1, E_2) à l'origine des axes. Finalement, le paramètre δ est déterminé à partir de la courbe de complaisance, (J_1, J_2) tel que défini par Cornil (1968). Rappelons que la complaisance est l'inverse du module.

La fonction τ est appelée temps de relaxation et dépend de la température, soit :

$$\tau(T) = \tau_0 a_T \quad (\text{Éq. 6.2})$$

Où a_T est le facteur de translation tel que défini à l'équation 1.9 à la section 1.2.4.4. Il prend une valeur unitaire pour la température de référence, T_{ref} .

L'expression analytique présentée (équation 6.1) permet de décrire correctement le comportement rhéologique des enrobés bitumineux pour de petites déformations, c'est-à-dire dans le cas où le comportement de l'enrobé demeure dans le domaine viscoélastique linéaire (Neifar, 1997).

À partir de nos résultats expérimentaux, il s'agit de déterminer la valeur des paramètres, E_{infini} , E_0 , k , h et δ . Pour ce faire, il faut séparer dans l'expression analytique la partie réelle de la partie imaginaire de manière à se rattacher aux composantes des modules complexes mesurés en laboratoire.

Puisque :

$$E^*(i\omega\tau) = E_1(\omega\tau) + i E_2(\omega\tau) \quad (\text{Éq. 6.3})$$

Alors, l'équation 6.1 peut s'écrire:

$$E_1 = E_0 + \frac{J_1}{(J_1^2 + J_2^2)} \text{ et } E_2 = \frac{J_2}{(J_1^2 + J_2^2)}$$

où :

$$J_1 = \frac{1 + \delta \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right)(\omega\tau)^{-k} + \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right)(\omega\tau)^{-h}}{(E_{\text{infini}} - E_0)}$$

$$J_2 = \frac{\delta \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)(\omega\tau)^{-k} + \sin\left(\frac{h\pi}{2}\right)(\omega\tau)^{-h}}{(E_{\text{infini}} - E_0)} \quad (\text{Éq. 6.4})$$

6.4.1 Calcul des paramètres E_0 , E_{∞} , k , h et δ

À partir de la feuille de calcul développée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, le LCPC, les paramètres E_0 , E_{∞} , k , h et δ ont été déterminés pour l'enrobé EG-10B et présentés au tableau XIX. Les résultats de la mesure des modules complexes pour l'enrobé EG-10A sont insuffisants pour mettre en application le modèle de Huet-Sayegh.

Les valeurs obtenues pour l'enrobé EG-10B sont comparables à celles présentées dans la littérature. Ces paramètres représentent des propriétés intrinsèques de l'enrobé et permettent de décrire l'ensemble de son comportement rhéologique en petites déformations.

La figure 6.9 présente dans le domaine de Cole-Cole l'ensemble des résultats expérimentaux de l'enrobé EG-10B et le modèle de Huet-Sayegh établi à partir des résultats de l'enrobé EG-10B. La figure 6.10 présente ces mêmes résultats mais cette fois dans le domaine de Black.

En fait, l'optimisation des paramètres du modèle de Huet-Sayegh a été faite à partir du domaine de Black. Le domaine de Black permet une meilleure définition pour les faibles modules alors que l'espace de Cole-Cole donne plus d'informations pour les modules élevés. Les résultats présentés à la figure 6.9 montrent que les essais effectués à haute température (les modules les plus faibles) sont ponctués d'une plus grande incertitude ; la théorie de la VEL est alors douteuse.

Tableau XIX

Valeurs des paramètres E_0 , E_{∞} , k , h et δ pour l'enrobé EG-10B et d'autres enrobés tirées de la littérature

Paramètres du modèle de Huet-Sayegh					Type d'enrobé		Source
E_0 (MPa)	E_{∞} (MPa)	k	h	δ	Liant ⁽¹⁾	D_{\max}	
40	38 000	0,23	0,64	2,89	100/120	10 mm	Enrobé EG-10B
50	29 000	0,20	0,57	2,00	50/70	6 mm	Neifar, 1997
45	25 000	0,22	0,70	2,90	50/70	6 mm	De la Roche, 1996
50	23 000	0,25	0,74	2,80	50/70	6 mm	

⁽¹⁾ : pénétration (dixième de millimètre)

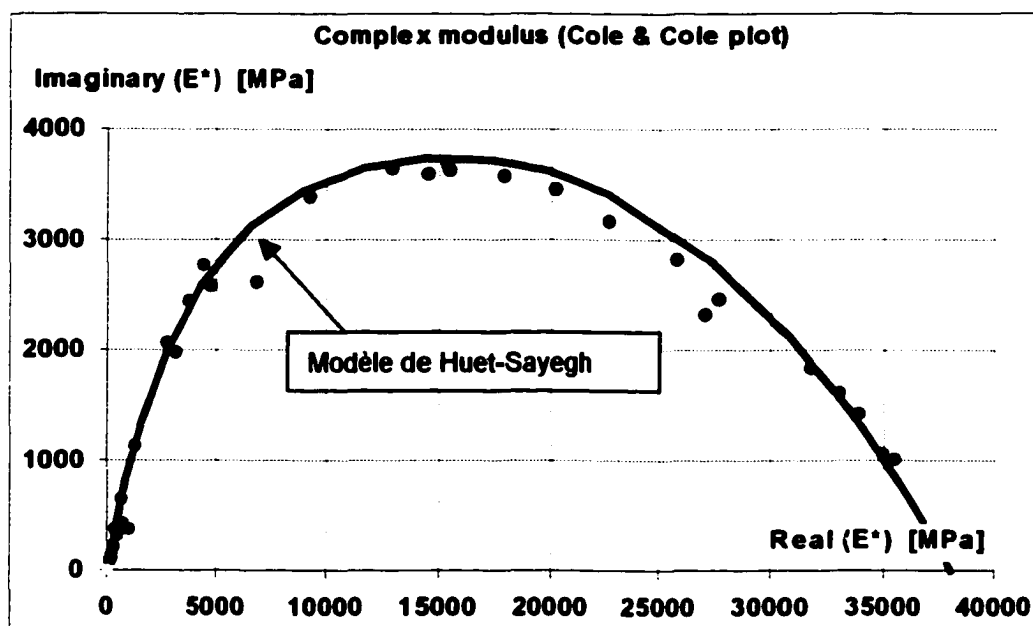


Figure 6.9 : Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux de l'enrobé EG-10B et du modèle de Huet-Sayegh tiré des résultats de l'enrobé EG-10B

Les figures 6.9 et 6.10 montrent que le modèle de Huet-Sayegh permet une bonne représentation des résultats pour l'enrobé EG-10B.

Comme démontré, le modèle de Huet-Sayegh permet de transposer les résultats des essais de mesure du module complexe en une fonction analytique qui permet de calculer facilement la norme du module complexe pour l'ensemble des couples de valeurs température-fréquence.

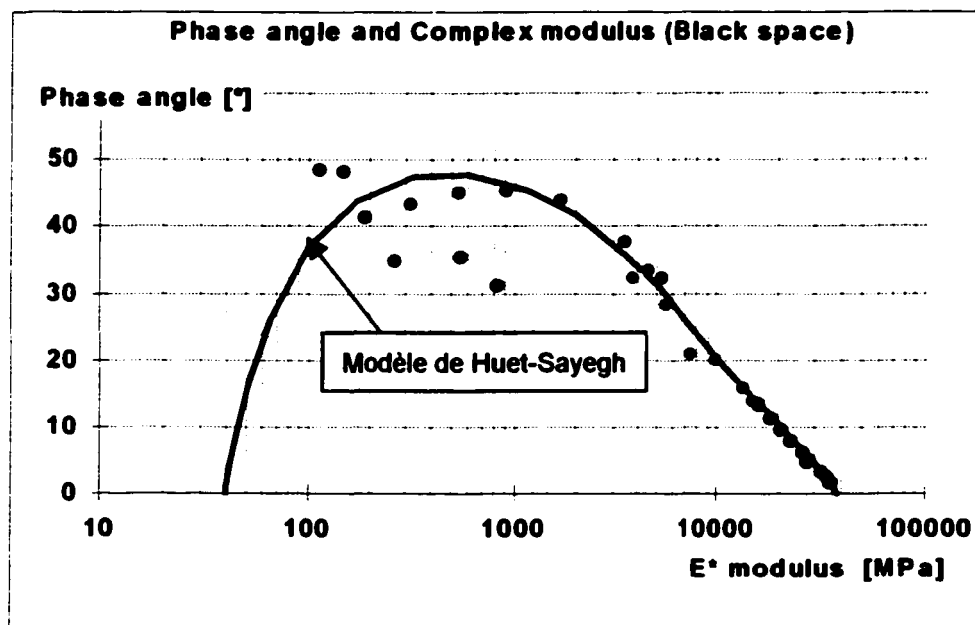


Figure 6.10 : Représentation dans le domaine de Black des résultats expérimentaux de l'enrobé EG-10B et du modèle de Huet-Sayegh tiré des résultats de l'enrobé EG-10B

CONCLUSION

La caractérisation du comportement des enrobés bitumineux sur toute la gamme de température à laquelle ils sont soumis dans les chaussées est une tâche complexe. Pour caractériser sa résistance à basse température, l'essai de retrait thermique empêché est valable. L'essai de mesure du module complexe par un essai cyclique sinusoïdal en contrainte alternée (tension-compression) semble, quant à lui, bien caractériser le comportement des enrobés pour une vaste gamme de fréquences et de températures. Selon la revue de la documentation, ce sont les deux essais les plus représentatifs du comportement de l'enrobé dans la chaussée.

Le comportement rhéologique des enrobés bitumineux est fortement tributaire des paramètres des essais employés. Le bon contrôle de ces paramètres, soit la température, la contrainte, la déformation et la vitesse d'application de la contrainte ou de la déformation est essentiel afin d'être précis dans les résultats.

Le paramètre d'essai le plus complexe à contrôler est la température au sein de l'éprouvette testée. En plus d'être complexe à contrôler, ce paramètre influence très fortement les résultats des essais. L'utilisation d'une période de conditionnement d'une durée minimale de quatre heures permet d'avoir une température homogène au sein de l'éprouvette.

L'homogénéité du champs de contrainte au sein de l'éprouvette est également très importante. Afin d'assurer cette homogénéité, les casques doivent être parfaitement centrés et perpendiculaires à l'axe longitudinale de l'éprouvette. L'homogénéité du champs de contrainte est également directement relié à l'homogénéité de la température au sein de l'éprouvette testée.

Pour ce qui est du domaine de linéarité du comportement viscoélastique des enrobés bitumineux testés, il change avec la température, mais une déformation de 30 μ def nous assure de rester dans ce domaine. Par contre, une aussi faible déformation

augmente le risque d'erreur dû à la précision de la mesure de la cellule de charge et à la précision de la mesure de la déformation par les extensomètres.

Les deux enrobés bitumineux testés ont eu des comportements semblables à ce que l'on s'attendait, selon la revue de la documentation, lors des essais de mesure du module complexe et de TSRSTS. De plus, l'application du modèle de Huet-Sayegh permet d'obtenir une fonction analytique de la norme du module complexe qui valide bien nos résultats de mesure du module complexe. Par contre, il n'a pas été possible de différencier l'enrobé EG-10A (10% de filler) de l'enrobé EG-10B (7% de filler et 18% de sable naturel) par les résultats des essais.

Les procédures que nous avons établies lors de cette campagne expérimentale sont valides puisque les résultats obtenus suite aux essais effectués selon ces procédures sont semblables à ceux trouvés dans la littérature.

La série d'essais que nous avons réalisés nous a permis de constater qu'il nous était possible d'effectuer les essais de TSRSTS et de mesure du module complexe avec l'équipement que nous possédons au LUCREB. Une nouvelle série d'essai avec une plus grande variété d'enrobé qui ont des caractéristiques distinctes (teneur et type de filler, teneur et type de bitume, granulométrie, etc.) devrait être envisagé afin de bien valider les paramètres d'essais sélectionnés dans ce programme expérimental.

RECOMMANDATIONS

Suite à notre programme expérimental, nous avons quelques recommandations à faire pour des travaux futurs sur la mesure du module complexe ou sur la résistance à basse température mesurée avec l'essai TSRSTS.

- 1. Le thermocouple de type K de l'enceinte climatique devrait être changé pour un thermocouple plus précis. Un thermocouple de type PT-100 serait beaucoup mieux adapté à la précision que l'on désire (Faucont-Dumont 2002);**
- 2. Le thermocouple de l'enceinte climatique devrait être déplacé pour être collé à la surface de l'éprouvette testée;**
- 3. L'enceinte climatique devrait être mieux isolée autour des systèmes d'attaches. Le produit utilisé pour isoler doit permettre le libre mouvement du piston;**
- 4. La lumière de l'enceinte devrait toujours demeurer éteinte en cours d'essais, car il s'agit d'une source de chaleur importante;**
- 5. Il devrait y avoir un matériau isolant entre le système d'attache de la presse et le piston. L'huile dans le piston est chaude et le système d'attache peut facilement transmettre cette chaleur au casque de l'éprouvette et à l'éprouvette;**
- 6. Des thermocouples devraient être placés dans le haut et dans le bas de l'éprouvette afin de vérifier s'il y a des ponts thermiques;**
- 7. L'endroit exact de la rupture de l'éprouvette lors d'un essai TSRSTS devrait toujours être noté;**

8. **Un troisième guide devrait être ajouté au banc de collage. Ce troisième guide permettrait de réduire la distance entre les appuis et d'assurer par le fait même un meilleur support à l'éprouvette;**
9. **Utiliser des cales biaises entre le système d'attache supérieur et le piston et entre le système d'attache inférieur et la cellule de charge. Ces cales biaises permettent d'enlever le jeu qui peut se créer à ces jonctions;**
10. **Un système permettant de peser la bonbonne d'azote liquide devrait être ajouté. En pesant la bonbonne, il serait possible de savoir la quantité d'azote utilisée et restante afin de ne pas en manquer en cours d'essai. Les jauges de quantité sur les bonbonnes d'azote sont très peu précises lorsqu'elles fonctionnent;**
11. **Utiliser une plus grande déformation pour les essais de mesure du module complexe. L'utilisation d'une déformation différente pour chaque température d'essai est envisageable;**
12. **D'autres essais de TSRSTS devraient être effectués avec des enrobés qui ont un grade de bitume différent;**
13. **Lors de la cure des enrobés dans les étuves, des précautions devraient être prises afin de limiter le contact de l'enrobé avec l'air. Simplement placer un couvert sur l'enrobé serait suffisant;**
14. **L'entreposage des éprouvettes à tester dans un congélateur à la température d'essais 6 heures avant le début de celui-ci permettrait de faire plusieurs essais par jour.**

ANNEXE 1

Le coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique représente un changement de longueur ou de volume en fonction de la température. Une augmentation de la température amène une plus grande vibration des atomes dans le matériau ce qui augmente la distance entre chacun des atomes. Cet éloignement des atomes crée une augmentation de volume du matériau (Shackelford 2000).

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_l}{\Delta T} \quad (\text{Éq. A1.1})$$

Où :

α : coefficient de dilatation / contraction thermique;

$\Delta \varepsilon_l$: déformation longitudinale ou volumétrique due à la température;

ΔT : différence de température.

L'équation 1 montre que plus un matériau change de dimensions sous l'effet de la température, plus le coefficient de dilatation thermique sera élevé (en valeur absolue). Dans le cas des enrobés bitumineux, un abaissement de température amène un retrait, donc une déformation négative, une contraction.

Pour un matériau homogène et isotrope, le coefficient de dilatation thermique linéaire est égal au tiers du coefficient de dilatation thermique volumique (Yusuf et coll 1999). En fait, en étant isotrope, le matériau étudié se dilatera ou se contractera uniformément dans les trois dimensions s'il n'est pas retenu. L'enrobé est un matériau non homogène et anisotrope. Selon Di Benedetto et Neifar (1997) il peut y avoir de 30% à 50% de variation entre les coefficients de dilatation thermique dans les différentes directions. Cette variation est probablement due à l'effet du compactage qui force l'orientation des granulats (Di Benedetto et de la Roche 1998).

Pour trouver le coefficient de dilatation thermique, on peut utiliser une méthode statistique qui tient compte de la composition de l'enrobé (équation A1.2). Cette méthode a été validée pour des températures allant de 0 à -25°C (Yusuf et coll 1999).

$$\alpha_{mix} = \frac{1}{3} \left(\frac{(V_{AC} + V_{AIR})B_{AC} + V_{AGG}B_{AGG}}{V_{TOTAL}} \right) \quad (\text{Éq. A1.2})$$

Où :

- α_{mix} : coefficient de dilatation thermique linéaire de l'enrobé(mm/mm°C);
- B_{agg} : coefficient de dilatation thermique volumique des agrégats(mm/mm°C);
- B_{ac} : coefficient de dilatation thermique volumique du liant (mm/mm°C);
- V_{ac} : quantité de liant dans l'enrobé (% en volume);
- V_{agg} : quantité d'agrégats dans l'enrobé (% en volume);
- V_{total} : 100%;
- V_{air} : quantité d'air dans l'enrobé (% en volume).

Cette méthode exige que le coefficient de dilatation du bitume et celui des granulats soient connus ce qui n'est pas toujours le cas. L'équation A1.2 montre que les auteurs ont admis que le coefficient de dilatation de l'enrobé varie proportionnellement avec les différents coefficients des composantes et de leurs volumes, ce qui laisse supposer que l'enrobé est un matériau isotrope.

En laboratoire, le coefficient de dilatation thermique de l'enrobé peut être trouvé en plaçant une éprouvette d'enrobé dans une chambre à température contrôlée munie d'extensomètres pour suivre l'évolution de la déformation en fonction de la température. Bien entendu, la déformation dans toutes les directions doit être étudiée car l'enrobé est anisotrope.

D'après C-SHRP (2000), le coefficient de dilatation thermique des enrobés bitumineux est constant de 0°C à -25°C car le raccourcissement de l'enrobé se fait de façon linéaire. De -25°C à -45°C, le raccourcissement diminue avec la baisse de température.

ANNEXE 2

Procédure pour la sédimentométrie

I.2.1 SÉDIMENTOMÉTRIE DES CEMENTS

La technique pour mesurer la distribution des particules d'un ciment par la méthode de la sédimentométrie est d'autant plus intéressante puisqu'elle permet de connaître la granulométrie du ciment sans nécessiter un investissement important au niveau des équipements. Compte tenu de la durée de l'essai, cet essai ne représente pas nécessairement un essai de contrôle de la qualité tel que la mesure de la finesse par l'essai Blaine. Par contre, dans bien des cas, elle peut permettre d'avoir une bonne idée de la distribution des particules de certains granulaires très fins, les "*fillers*", couramment utilisés dans la formulation de différents produits composites (ciment, mortier, époxy, etc). Vous devez cependant être conscient que chaque méthode de mesure a ces limites. Dans le cas de la mesure avec sédimentométrie appliquée à la mesure des ciments Portland, vous devez porter une attention particulière quant au risque de floculation des grains de ciment en cours d'essai (souvent observable par une agglomération des particules en tas à la paroi du cylindre). Pour prévenir cet effet d'agglomération, nous allons utiliser un anti-floculant, un superplastifiant. D'autre part, il convient de rappeler que le développement de la méthode de calcul est basé sur l'hypothèse que les particules sont de forme sphérique. Certains "*fillers*" ont plutôt des particules en forme de feuillets.

On ne doit pas utiliser d'adjuvant autre que le superplastifiant pour l'essai de sédimentométrie. La procédure d'essai est donnée ci-dessous.

L'essai consiste à mettre en solution dans un cylindre de sédimentation contenant 1 litre d'eau (et 10 ml de

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

fluidifiant) une quantité de ciment (50g). Après avoir agité la solution, on mesure la masse volumique de la solution en fonction du temps. La sédimentométrie est basée sur la loi de stokes qui exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et son diamètre.

ÉQUIPEMENT:

Cylindre de 1 litre;
Hydromètre type 151-H;
Balance: capacité de 3000 g \pm 0,01g;
Eau distillée, déminéralisée;
Antifloculant (un superplastifiant);
Seringue et un récipient de rinçage;
Thermomètre au degré près;

MODE OPÉRATOIRE

- 1) prélever un échantillon de ciment de $50 \pm 0,01$ g passant le tamis de 800 μ m

Note: l'échantillonnage de ciment doit se faire suivant la norme CAN3-M83.

- 2) remplir à moitié la coupe de dispersion avec de l'eau distillée ou déminéralisée puis ajouter la prise d'essai (50 g de ciment) et bien malaxer avec l'agitateur pendant une minute;
- 3) décrocher la coupe d'agitation et rincer l'arbre et les palettes de manière à récupérer toutes les particules de la prise d'essai;
- 4) verser la prise d'essai dans le cylindre de sédimentation et rincer la coupe d'agitation de manière à récupérer toutes les particules puis remplir le cylindre avec de l'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à environ 10 mm du repère de 1000 mL;
- 5) ajouter 10mL d'agent défloculant (12 g) et finir de remplir le cylindre jusqu'au repère 1000 mL avec de l'eau distillée ou déminéralisée;
- 6) boucher le cylindre puis le retourner sens dessus dessous 30 fois pendant une minute;
- 7) déposer le cylindre dans un endroit approprié à température constante et **exempt de vibration** et déclencher le chronomètre;
- 8) introduire l'hydromètre dans la suspension en limitant les oscillations verticales et prendre des lectures R_i en haut du ménisque aux temps $t = 0,5$, $t = 1$ et $t = 2$ minutes. **Ces lectures sont dites immergées, car l'hydromètre n'est pas retiré de la solution entre deux lectures: LIRE EN HAUT DU MÉNISQUE.**
- 9) agiter le cylindre de nouveau comme un point 8) et prendre les lectures aux temps $t = 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180$ et 240 minutes. **L'hydromètre est retiré entre chaque lecture: mesures ponctuelles.**
- 10) mesurer la température de la suspension pour chaque lecture à compter du temps $t = 15$ minutes en insérant le thermomètre, sans l'agiter, jusqu'à une profondeur correspondant approximativement au centre de gravité de l'hydromètre lors de la lecture précédente;
- 11) à la fin de l'essai, boucher le cylindre et l'agiter de manière à décoller le ciment qui aurait adhéré au fond. Verser la suspension sur un tamis de 80 μ m et récupérer les particules retenues pour déterminer la masse de refus M_r avec une précision de 0,01 g. Pour récupérer le retenu 80 microns, on mobilise à l'aide d'un faible jet d'eau, le ciment dans une section du tamis, le renverser au dessus d'un récipient et forcer alors la récupération des particules à l'aide d'un jet d'eau passant à travers le tamis.

Note #1: Les étapes 12 et 13 vont permettre de déterminer la masse volumique du milieu de décantation soit l'eau

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

contenant une quantité de superplastifiant

Note #2: la correction du ménisque est de 0,5

- 12) préparer le cylindre témoin: dans un cylindre identique à celui prévu pour l'essai, préparer une solution contenant 10 mL de défloculant et compléter à 1000 mL avec de l'eau distillée ou déminéralisée et bien agiter;
- 13) introduire l'hydromètre dans le cylindre témoin et noter la lecture R' . Répéter l'opération 4 à 5 fois en variant légèrement la température de l'eau puis tracer la courbe R' en fonction de la température. La valeur R' retenue pour l'essai sera celle qui correspondra à la température de l'échantillon;

COMPILATION DES RÉSULTATS POUR LES ESSAIS EN LABORATOIRE:

Le tableau de la page suivante permet de compiler les résultats obtenues des mesures en laboratoire.

CALCUL ET EXPRESSION DES RÉSULTATS

- 1) le pourcentage de refus sur le tamis de 80 μm est déterminé par:

$$Pr(\%) = \frac{M_c - M_r}{M_c} \times 100$$

où M_c : masse de la prise de ciment (g)
 M_r : masse de refus sur le tamis de 80 μm (g)

- 2) le diamètre des particules est déterminé en considérant que ces particules (supposées sphériques) se trouvaient au début de l'essai à la surface de la suspension et que, par la suite, elles sont descendues dans la suspension. Ainsi, selon la loi de Stokes, le diamètre D en micromètre est obtenu par la formule suivante:

$$D = \sqrt{\frac{3\eta}{9,8(D_{rc} - D_{ri})} \times \frac{H}{T} \times 1000}$$

où D : diamètre des particules (μm)
 H : lecture à l'hydromètre (cm); peut avoir respectivement les valeurs de H' où de H dans le cas d'une lecture immergée ou d'une lecture ponctuelle;
 $H = -0,265 R_i + 17,5$ pour l'hydromètre 151-H
 $H = -0,164 R_i + 17,5$ pour l'hydromètre 152-H
 $H' = -0,265 R'_i + 16,3$ pour l'hydromètre 151-H
 $H' = -0,164 R'_i + 16,3$ pour l'hydromètre 152-H
 r : la lecture de la densité sur l'hydromètre 151-H
 R_i : lecture à l'hydromètre dans la suspension (mesure ponctuelle). Dans le cas

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

de l'hydromètre 151-H, $R_i = 1000 \times (r-1)$;

Note : dans le cas de l'hydromètre 152-H, la lecture de la densité correspond directement à la valeur de R_i .

- R'_i : lecture directe à l'hydromètre dans la suspension (mesure immergée);
 η : viscosité de l'eau = $1619,62e^{-0,024 \times T^{\circ C}}$ (Pascal-seconde);
 t : temps en minute pour chaque lecture;
 D_{rc} : densité des particules de ciment (3,150);
 D_{ri} : densité du liquide de suspension lue dans le cylindre témoin (1,0).

Cette formule peut être simplifiée de la façon suivante:

$$D(\mu m) = K \sqrt{\frac{H}{t}} \text{ ou } D(\mu m) = K' \sqrt{\frac{H'}{t}}$$

- où K : constante qui dépend de la densité des particules et de la température de l'essai (voir tableau fiche d'essai), et qui peut être déterminée par la formule:

$$K = 553,2 \times c \times d$$

- où c : $1,68239 \times D_{rc}^{-0,79063}$
 d : $0,06557 \times T_i^{-0,24334}$

- 3) le pourcentage des particules (P%) de diamètre inférieur au diamètre équivalent (pourcentage passant) est déterminé à l'aide des formules suivantes:

- pour l'hydromètre 152 H

$$P = \alpha \times (R_i - R')$$

- où α : $F_2 \times f \times 100/M_c$

- pour l'hydromètre 151-H

$$P = \alpha \times (R_i - R')$$

où $\alpha = \frac{100 D_{rc}}{M_c (D_{rc} - 1)} \times F_1$

- avec M_c : masse de la prise de ciment (g)
 D_{rc} : densité des particules de ciment (3,150)
 R' : lecture de la prise de ciment telle que décrite au point "4" à la section MODE

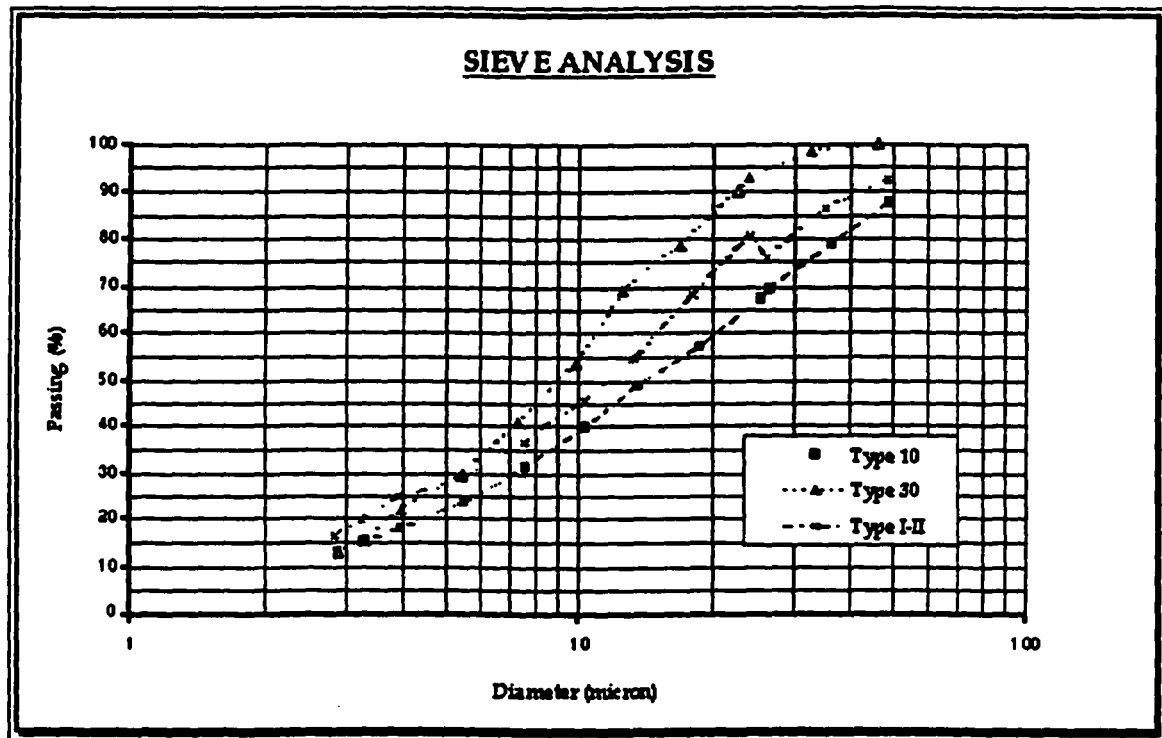
TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

OPÉRATOIRE

- R_i : lecture à l'hydromètre dans la suspension (R' dans le cas d'une lecture immergée)
f : $1,555 - 0,2091 \times D_p$: facteur de correction pour les différentes densités de particules solides
F₁, F₂ : facteurs de correction des échelles de densité pour les hydromètres 151-H et 152-H (déterminés lors du calibrage des hydromètres).

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS SOUS FORME GRAPHIQUE:

La figure suivante donne un exemple des résultats obtenus pour différents types de ciment.



ANNEXE 3

Préparation des éprouvettes

Cette annexe est un complément aux informations données au chapitre IV concernant la préparation des éprouvettes.

Afin que l'enrobé soit suffisamment refroidie pour pouvoir le manipuler, il faut attendre au minimum 48 heures après le compactage. Ensuite, les plaques sont coupées en deux parties égales sur le sens de la longueur à l'aide d'une scie au carbure (figure A3.1). Il est important d'avoir un bon débit d'eau lors de la coupe afin de ne pas abîmer la plaque à cause de la chaleur produit lors de la coupe.



Figure A3.1 : La scie utilisée pour couper les plaques d'enrobés bitumineux

L'étape suivante consiste au carottage des éprouvettes. Comme mentionné dans le chapitre IV, il faut éviter de carotter près des bords afin d'avoir des éprouvettes le plus homogène possible. La carotteuse utilisée (figure A3.2), a trois vitesses de rotation en

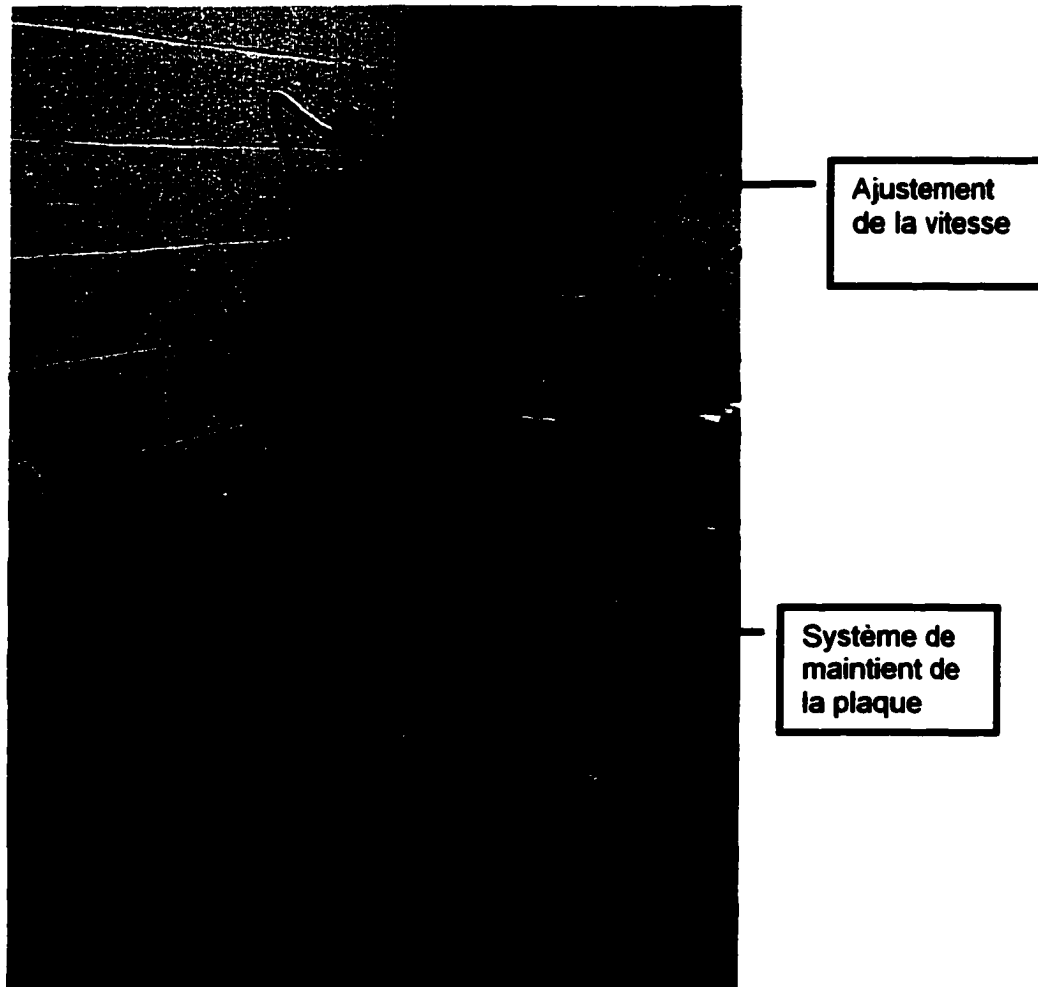


Figure A3.2 : La carotteuse

fonction de la grosseur de l'échantillon. Cette vitesse doit être bien ajustée avant la mise en marche de l'appareil.

Étant donné que la carotteuse est fixe, c'est à l'aide de planches de bois que la plaque est placée plus ou moins avancée dans le système de maintien. Les quatre boulons du système de maintien ne doivent pas être trop serrés car la plaque d'enrobé peut se

déformer assez facilement. Tant et aussi longtemps qu'il y a suffisamment de pression pour maintenir la plaque en place, c'est suffisant.

Comme pour la coupe, le carottage doit être fait avec un bon débit d'eau sinon, l'éprouvette ne sera pas utilisable pour les essais (figure A3.3). La vitesse d'avancement du carottier dans la plaque est fonction de la pression que l'opérateur applique. Une vitesse trop rapide créera des « vagues » sur l'éprouvette et une vitesse trop lente demande plus d'eau afin de ne pas faire chauffer l'éprouvette.

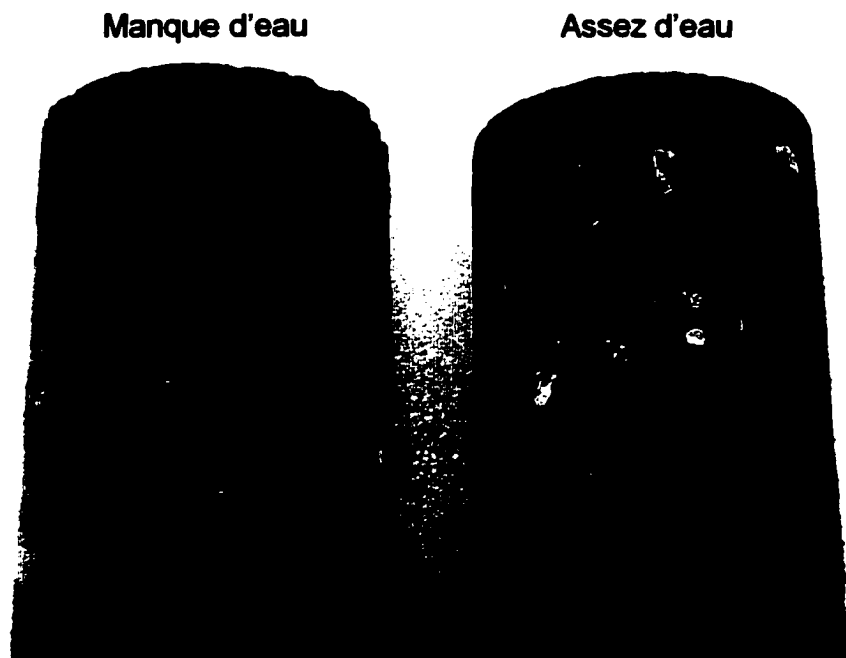


Figure A3.3 : Différence entre une échantillon carotter avec assez d'eau et un autre sans assez d'eau

Dans la présente recherche, les plaques d'enrobés ont été confectionnées aussi petite que possible à cause d'une planification de la quantité de granulat trop juste. Par conséquent, les éprouvettes ont été carottées trop près des extrémités pour garantir l'homogénéité comme montré sur les figure A3.4.

L'étape suivant consiste à couper l'éprouvette à la bonne longueur. La face coupée à l'aide la scie au carbure peut être considérée comme acceptable, donc c'est seulement

l'autre extrémité de l'échantillon qui sera coupé. Habituellement, les traies de scie sont suffisamment perpendiculaires à l'éprouvette pour ne pas avoir à surfacer les extrémités des éprouvettes avant de coller les casques d'aluminium, mais elles ont quand même été surfacées pour s'assurer de la perpendicularité.

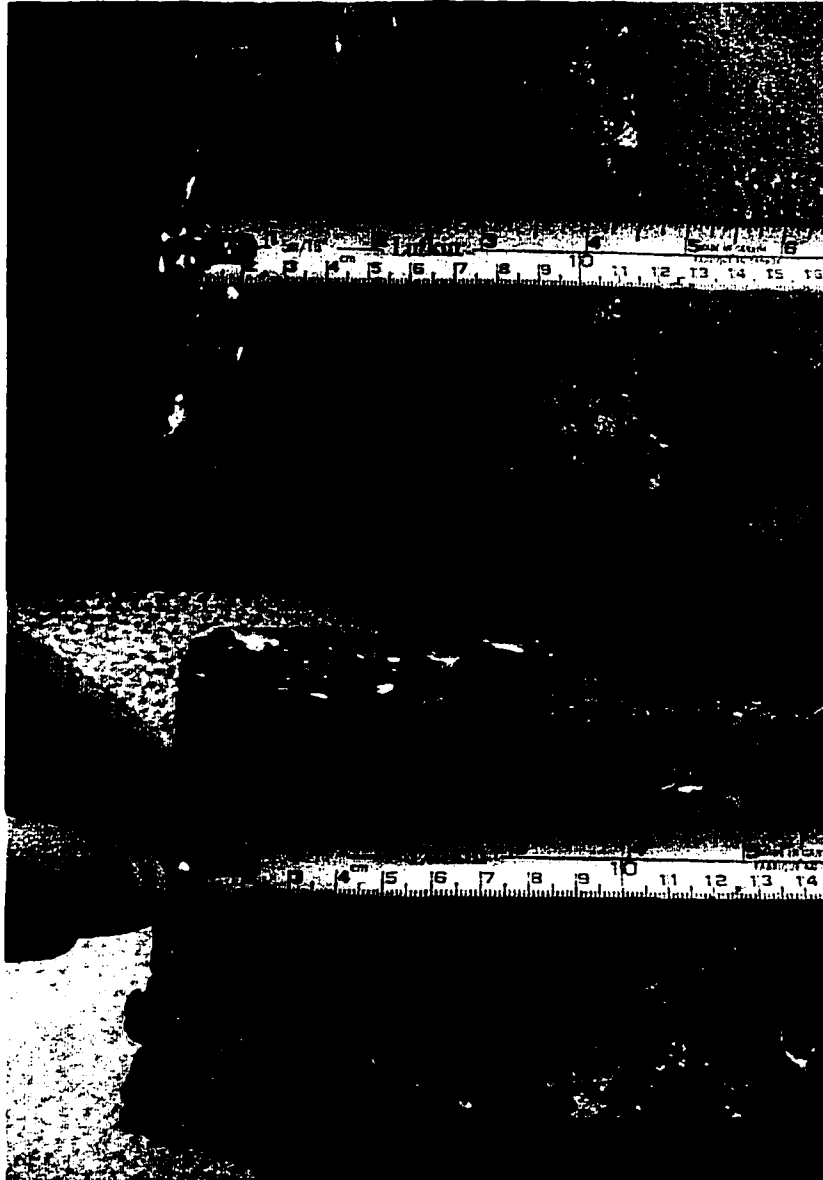
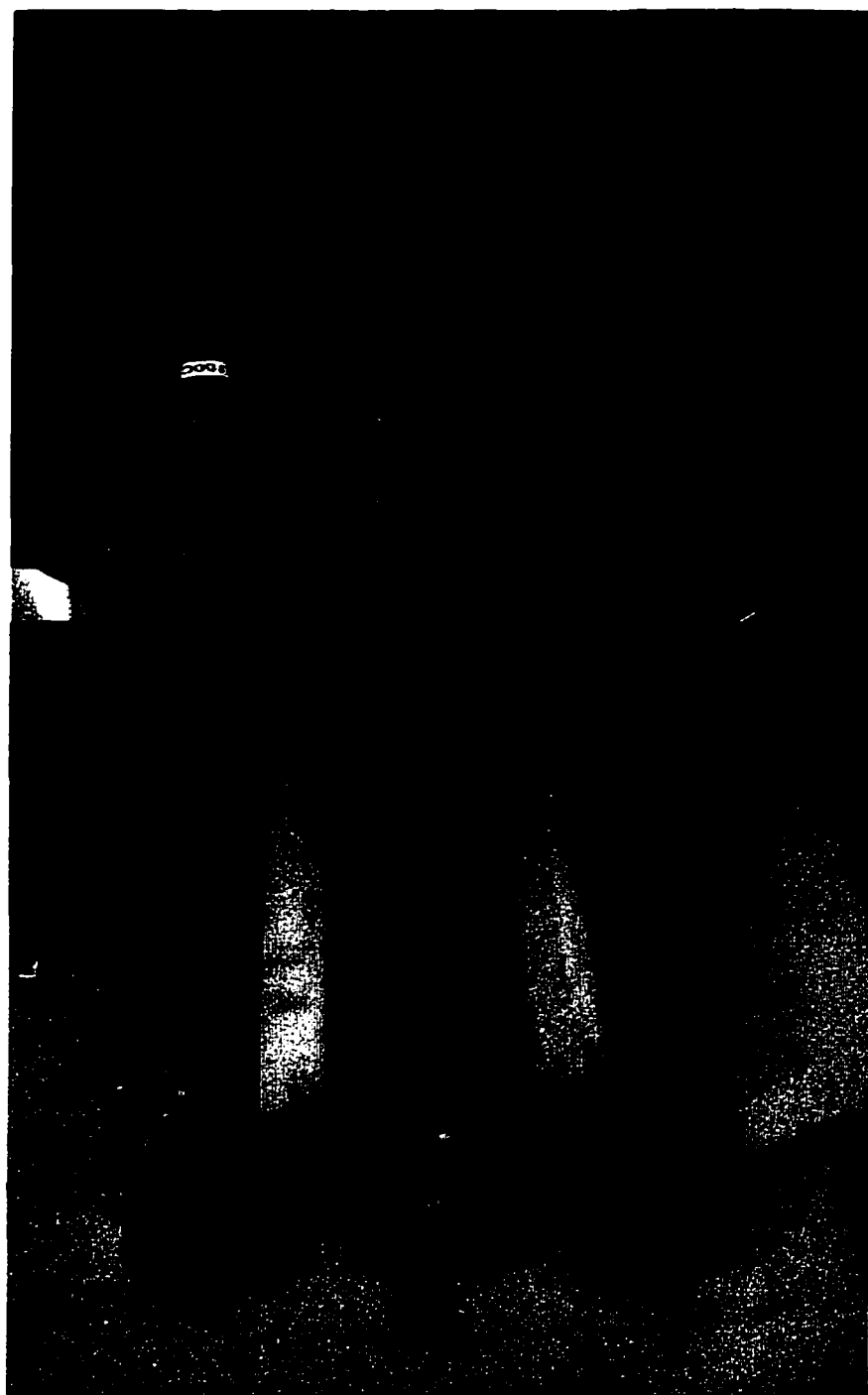


Figure A3.4 : Position des échantillons carottés près des extrémités de la plaque

Finalement, il ne reste qu'à entreposer les éprouvettes en attendant de coller les

casques. L'idéal serait de les entreposer à une température d'environ 10°C, mais pour l'instant, aucun réfrigérateur n'est disponible. Les éprouvettes ont été entreposées



Entreposage
dans un bac
de sable

Entreposage
sur de la
mousse

Figure A3.5 : Entreposage des échantillons prêts à être collés sur du foam ou dans un bac de sable

couchées dans des bacs de sable ou bien sur de la mousse dans une chambre à humidité et température contrôlées (HR = 50% et T = 20°C) (figure A3.5).

ANNEXE 4

Guide d'utilisation du système d'acquisition de données TESTSTAR II

Habituellement, avant de commencer, l'écran de veille est en fonction et l'ordinateur est verrouillé. Le « login name » pour commencer une session est **administration et le mot de passe est **admin**.**

- C:\winnt\profiles\all users\start menu\programs\teststar II
C:\ts2\config\mts 810;

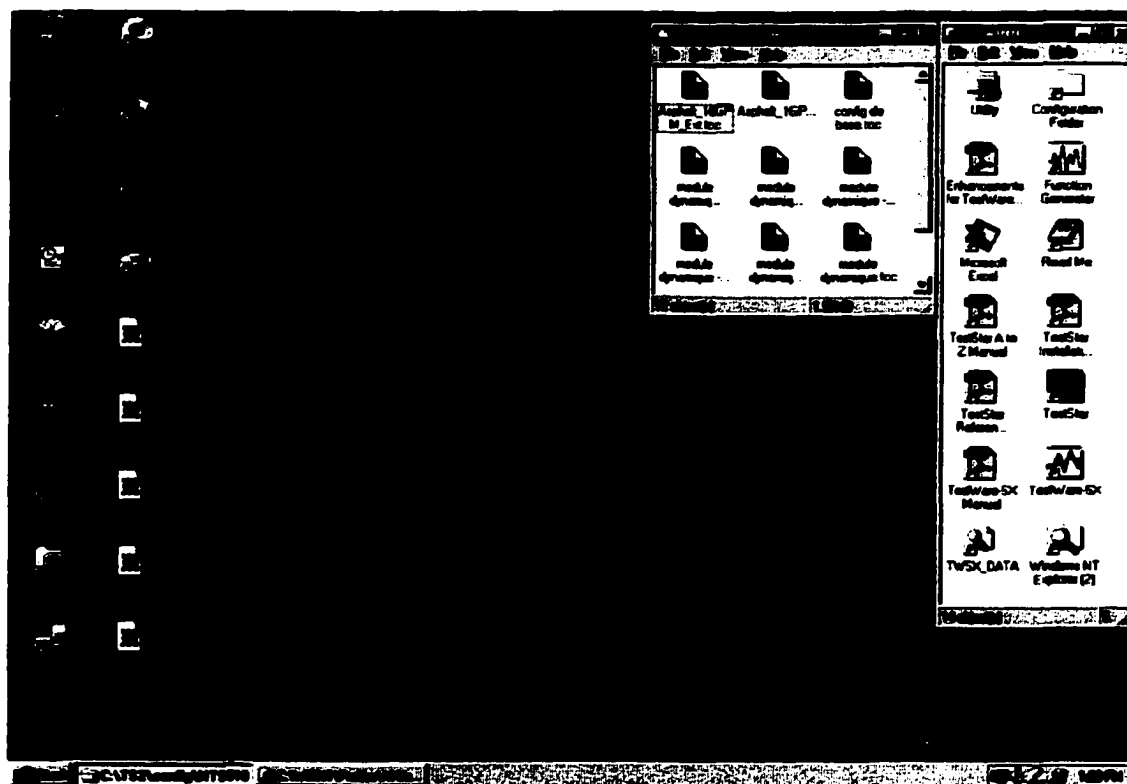


Figure A4.1 : Les deux premières fenêtres à ouvrir

2. La deuxième étape sert à choisir la configuration du logiciel dépendamment de l'utilisation voulue. Dans la fenêtre de **MTS810**, l'utilisateur peut choisir différente configuration. Les configurations **Module dynamique maîtrise** et **Retrait empêché** sont les deux configurations utilisées lors des essais de module complexe et de retrait thermique empêché de cette étude. Dans l'exemple présent, la configuration pour les essais de module dynamique a été sélectionnée.

Une fois sélectionné, une fenêtre **MTS Login** apparaît et il faut entrer un **Login name** et un **password**. Le login et le password sont **mts** en minuscule (figure A4.2).

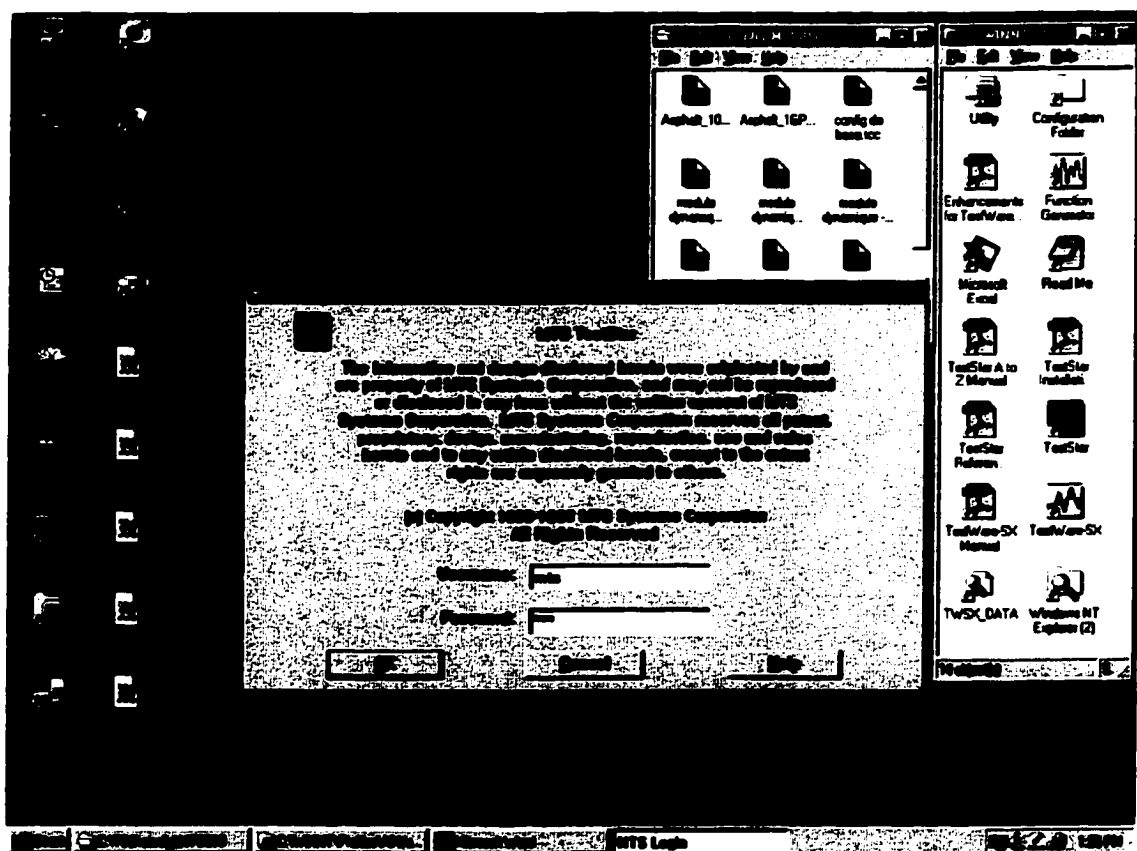


Figure A4.2 : Fenêtre d'ouverture d'une configuration

Si par la suite, une fenêtre **Teststar Message log** apparaît et qu'elle ne disparaît pas d'elle-même, il faut la fermer;

3. Une fenêtre **Fault status window** va probablement apparaître et c'est normal puisque le vérin de la presse a descendu, sous l'effet de son propre poids, plus bas que la limite inscrite lors de la dernière utilisation ce qui déclenche un message d'erreur (figure A4.3);

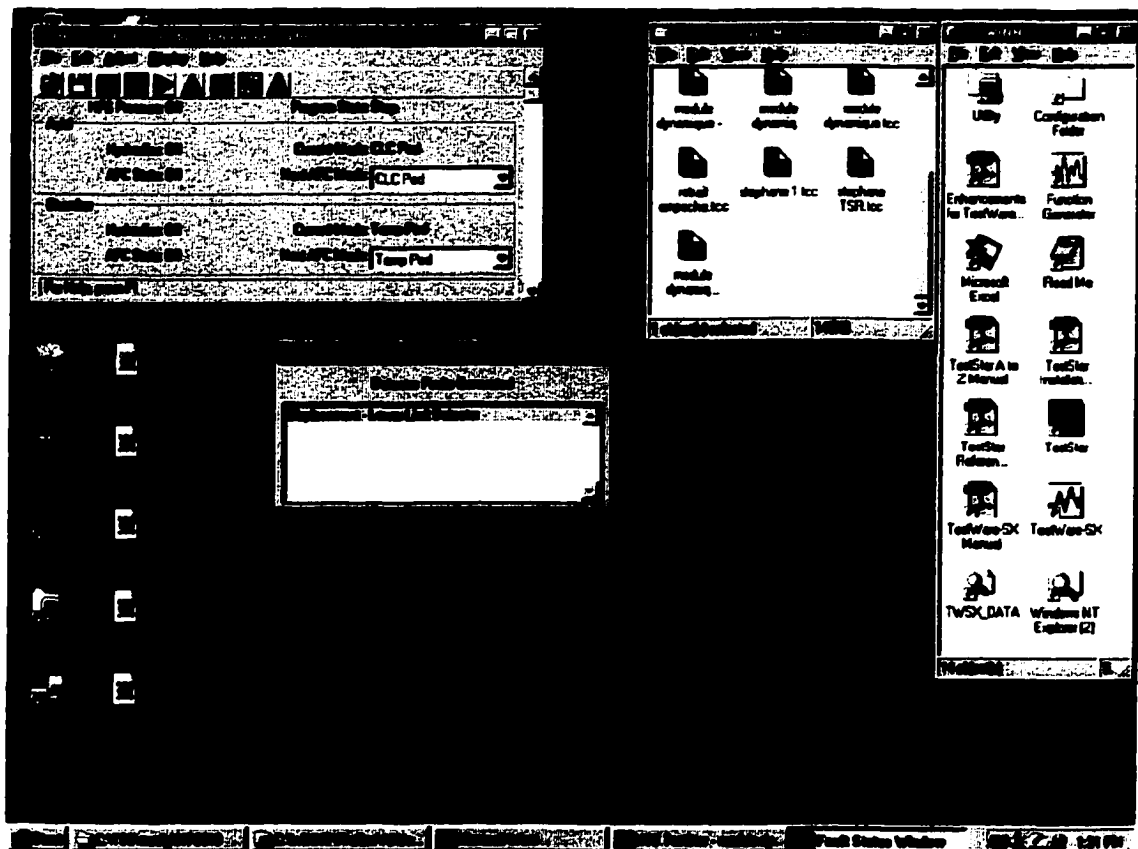


Figure A4.3 : Fenêtre d'erreur

4. Dans la fenêtre **MTS Teststar – Module dynamique maîtrise**, ouvrir les fenêtres **Display input signal** et **Display Detector Actions** (figure A4.4), en appuyant sur les icônes



et



5. Dans la fenêtre **Display Input Signals**, il faut vérifier l'intervalle d'utilisation (**Range**) de la force et du déplacement. Pour un essai de retrait thermique empêché le déplacement doit être à 100 et la force à 100. Pour un essai de module complexe, le déplacement doit être à 100 et la force à 10;

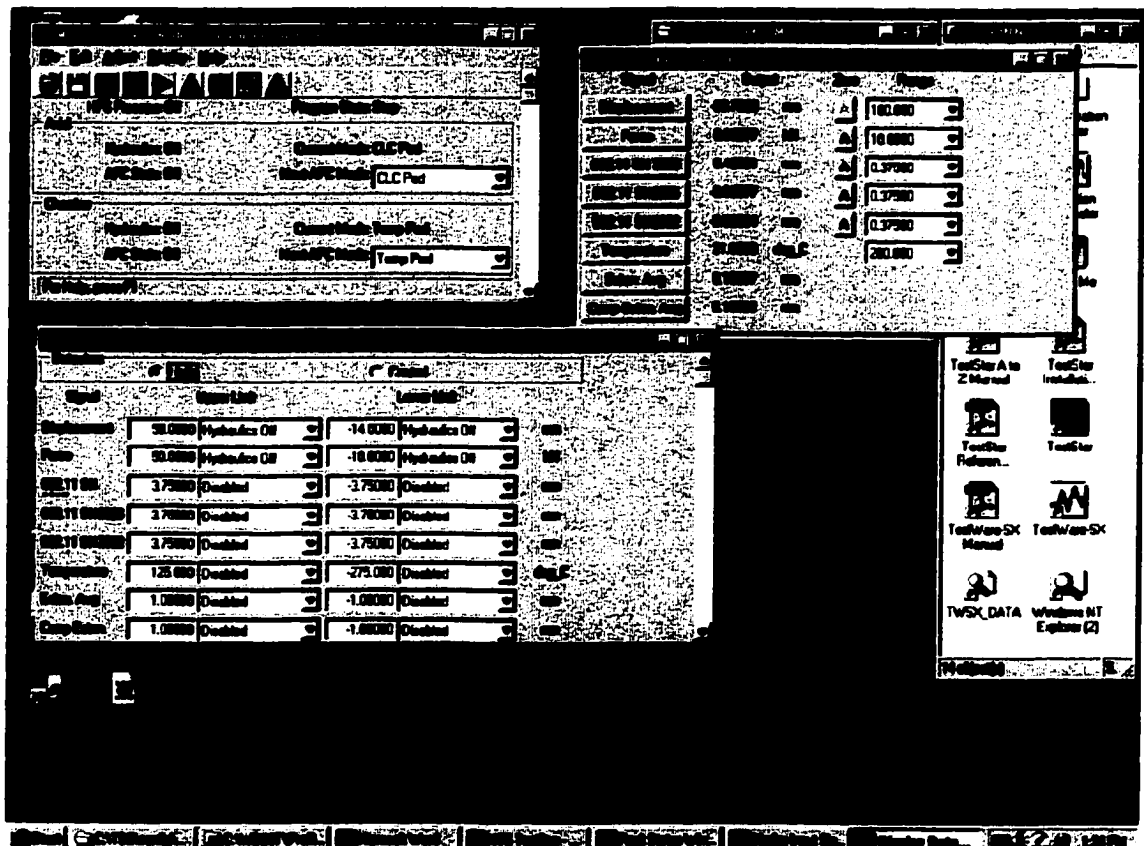


Figure A4.4 : Fenêtre des limites et de la situation actuelle

Si ce ne sont pas les bonnes valeurs dans un cas ou dans l'autre, c'est peut être parce qu'il y a eu un mauvais choix de configuration. Si la bonne configuration a été sélectionnée mais que les valeurs ne sont pas celles désirées, on peut les modifier en cliquant sur la flèche noire au bout de ces mêmes valeurs;

6. Il faut ensuite ajuster les limites pour pouvoir partir le système hydraulique. Habituellement, seulement la limite inférieure en déplacement est à ajuster dans la fenêtre **Display Detector Actions**. La position actuelle inscrite dans la

fenêtre **Display Input Signals** doit entrer dans les limites de la fenêtre **Display Detector Actions**;

7. S'il n'y a pas d'éprouvette dans la presse, une mise à zéro de la cellule de force peut être faite à cet instant. Pour ce faire, il suffit d'appuyer sur l'icône marquée **A** à droite de la valeur de la force dans la fenêtre **Display input signal**;
8. Sur le tableau de contrôle manuel (**Pod**) (figure A4.5), appuyé sur **Reset**;
9. À la fonction **Hps Control**, appuyé sur **low** puis sur **High**. C'est pour mettre le groupe hydraulique en fonction;
10. À la fonction **Hsm Control** situé au milieu du tableau de contrôle manuel (**Pod**), appuyé sur **low** puis **High**. C'est pour mettre la distribution hydraulique en fonction;

Dans la fenêtre sur le tableau de contrôle manuel (**Pod**), on doit voir la mention **CLC POD** sous l'inscription **Current mode**. Si ce n'est pas le cas mais que **CLC Mode** est écrit sous la mention **Pod mode**, le **current mode** deviendra **CLC Pod** lorsque le **Actuator Positioning control (APC)** sera mis à **On** (prochaine étape). Sinon, le mode peut être changé en appuyant sur **F1** situé en bas à gauche de la fenêtre du tableau de contrôle manuel (**Pod**). À chaque pression, le **Pod Mode** va changer. Une fois le **Pod Mode** en **CLC mode**, il ne reste qu'à mettre **APC** à **On**.

Le piston de la presse peut maintenant être monté à sa position de départ, soit environ 80mm. Pour ce faire mettre le **APC** à **On** puis utiliser la roulette. Une fois le positionnement terminé, appuyer de nouveau sur **On** de **APC** pour le mettre à **Off**. La dernière position du piston demandé restera en mémoire jusqu'à ce qu'un nouveau déplacement soit demandé.

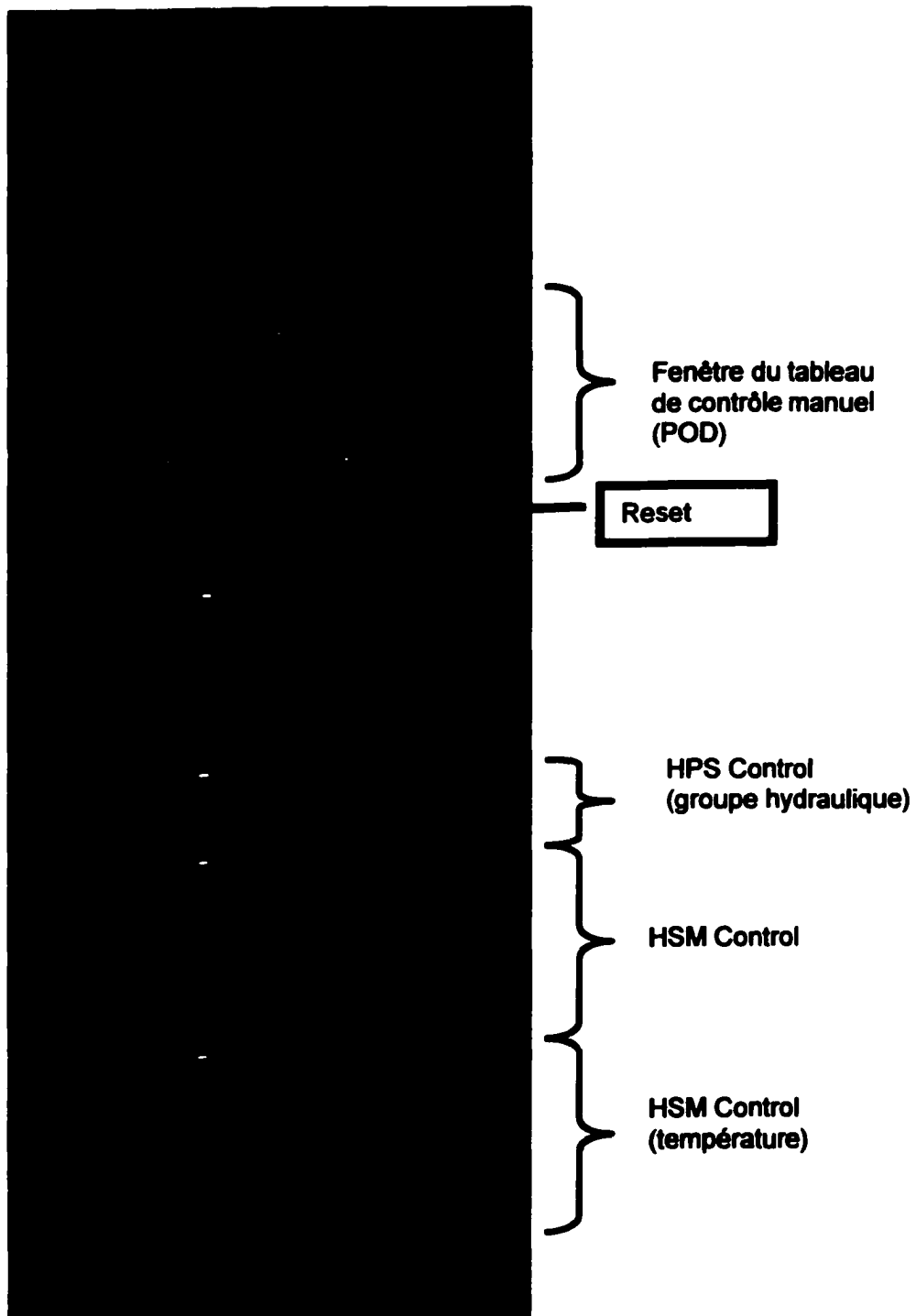



Figure A4.5 : Le tableau de contrôle manuel (POD)

11. À la fonction **Ham Control** situé au bas du **Pod**, appuyé sur **High**. C'est pour mettre le contrôle de température en fonction;
12. Ouvrir la valve d'arrivée sur la bonbonne d'azote liquide;
13. Vérifier si l'enceinte thermique est en mode **remote** ou **local** (figure A4.6). Elle doit être en mode **remote**. Si ce n'est pas le cas, appuyer sur  Le voyant de **A/M** doit être éteint.

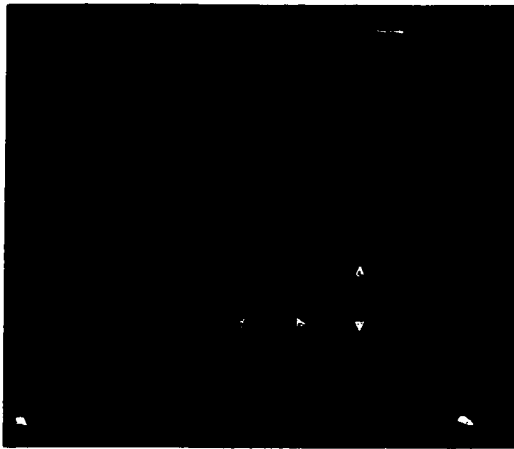


Figure A4.6 : Contrôle de l'enceinte thermique

14. Ouvrir la lumière de l'enceinte thermique à l'aide de l'interrupteur situé sur le côté de l'enceinte thermique, en dessous du panneau de contrôle;
15. À partir de la fenêtre **C:\...\...\programs\teststar II**, ouvrir un **Function generator**.

Une fois ouvert, sélectionner **Define** dans la barre de menu du générateur de fonction puis sur **command** (figure A4.7);

16. Dans la nouvelle fenêtre qui vient d'ouvrir, **Command menu options**, il faut régler les paramètres.

Control Channel → **Chamber**
Control Mode → **Temperature sg**
Units → **deg-°C**
Initial ramp rate → **1 et (deg_C/sec)**
Wave shape → **Sine**
Compensation → **Peak/valley**

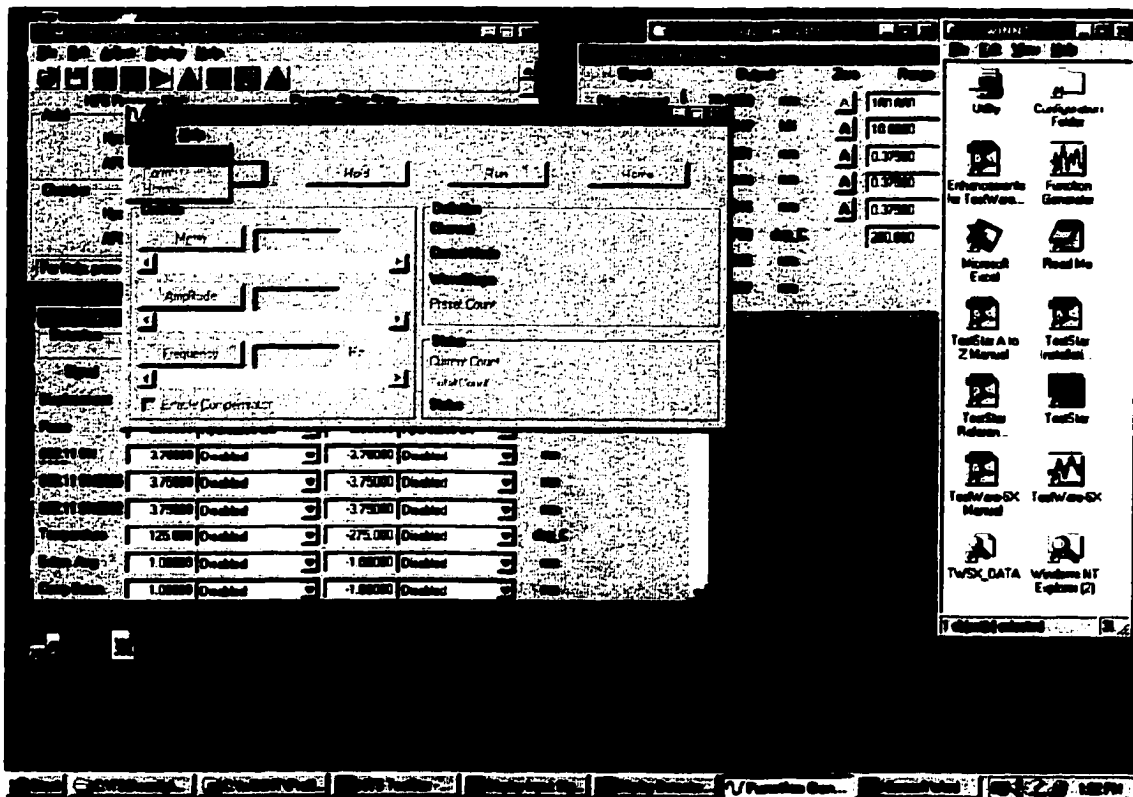


Figure A4.7 : La fenêtre du générateur de fonction

17. Il faut ensuite ouvrir un deuxième générateur de fonction et régler les paramètres en force cette fois-ci.

Control Channel → **Axial**
Control Mode → **Force sg**
Units → **kN**

Initial ramp rate → 1 et (kN/sec)

Wave shape → Sine

Compensation → Peak/valley

18. C'est maintenant le temps de placer l'éprouvette dans la presse et de la fixer par le haut seulement. Les fils des extensomètres doivent passer par la porte de l'enceinte thermique en évitant de superposer les fils. Finalement, les fils des extensomètres doivent être connectés au bon endroit (ils sont identifiés, le 1 avec le 1, etc.) ;

19. Avec le tableau de contrôle manuel (Pod), en mode CLC, mettre APC à On puis faire monter l'échantillon pour qu'il ne touche plus au support du bas. Une fois que c'est fait, remettre APC à off puis fermer la porte de l'enceinte.

Une fois l'éprouvette en place, il faut desserrer les boulons des tiges filetées situés sous le casque afin de laisser la possibilité à l'échantillon de se contracter. Les goupilles des extensomètres doivent demeurer en place.

20. Mettre l'enceinte thermique en marche en appuyant sur le bouton Chamber On situé sur le côté de l'enceinte ;

21. Dans le générateur de fonction de la température, inscrire la température désirée dans mean. L'amplitude doit être à 0 puis la fréquence à 0,05Hz (elle ne peut pas être à 0). Finalement, ne pas cocher enable compensator, puis le partir;

22. La période de conditionnement commence ici. Il peut y avoir un délai de 30 minutes et plus avant d'atteindre la température désirée. La période de conditionnement doit durer quatre heures à partir du moment où la température de la chambre est à la température désirée ;

23. Une fois la période de conditionnement terminée, l'éprouvette peut être fixée

dans sa position pour faire l'essai. Pour ce faire, ouvrir l'enceinte thermique pour mieux voir, mettre **APC à On** puis descendre l'éprouvette à l'aide de la roulette de contrôle. Une fois l'éprouvette près de la base, aligner l'éprouvette en vissant l'écrou du bas. Ne pas le serrer. Descendre l'échantillon jusque sur la base puis remettre le **APC à Off** ;

24. Dans le générateur de fonction de la force, inscrire **-0,05** dans **mean**. L'amplitude doit être à **0** puis la fréquence à **0,05Hz**. Finalement, ne pas cocher **enable compensator**, puis le partir ;

25. Dévisser les écrous situés au-dessus du casque ;

26. Il faut maintenant enlever les goupilles des extensomètres sans bouger ces derniers avant de fermer l'enceinte thermique. Les étapes 23, 24, 25 et 26 doivent être réalisés le plus rapidement possible afin de ne pas trop changer la température dans l'enceinte ;

27. Repartir l'enceinte thermique à l'aide de l'interrupteur situé sur le côté de l'enceinte ;

28. Une mise à zéro des extensomètres doit être faite à cet instant. Pour ce faire, il suffit d'appuyer sur l'icône marquée **A** à droite de chacune des valeurs des extensomètres dans la fenêtre **Display input signal**;

29. À partir de la fenêtre **C:\...\...\programs\teststar II**, ouvrir **Testware-SX** (figure A4.8) ;

30. Dans la fenêtre de **Testware-SX**, ouvrir une procédure en sélectionnant **file** puis **open template**. Les procédures existantes sont situées dans :
C:\ts2\twax\ts2alan\procedure testware sx

Les procédures ont comme extension *.000. Les deux procédures qui nous intéressent ici sont **module dynamique maîtrise** et **retrait empêché**.

31. Pour modifier une procédure existante, il suffit d'aller dans **file** puis **Edit template** ;

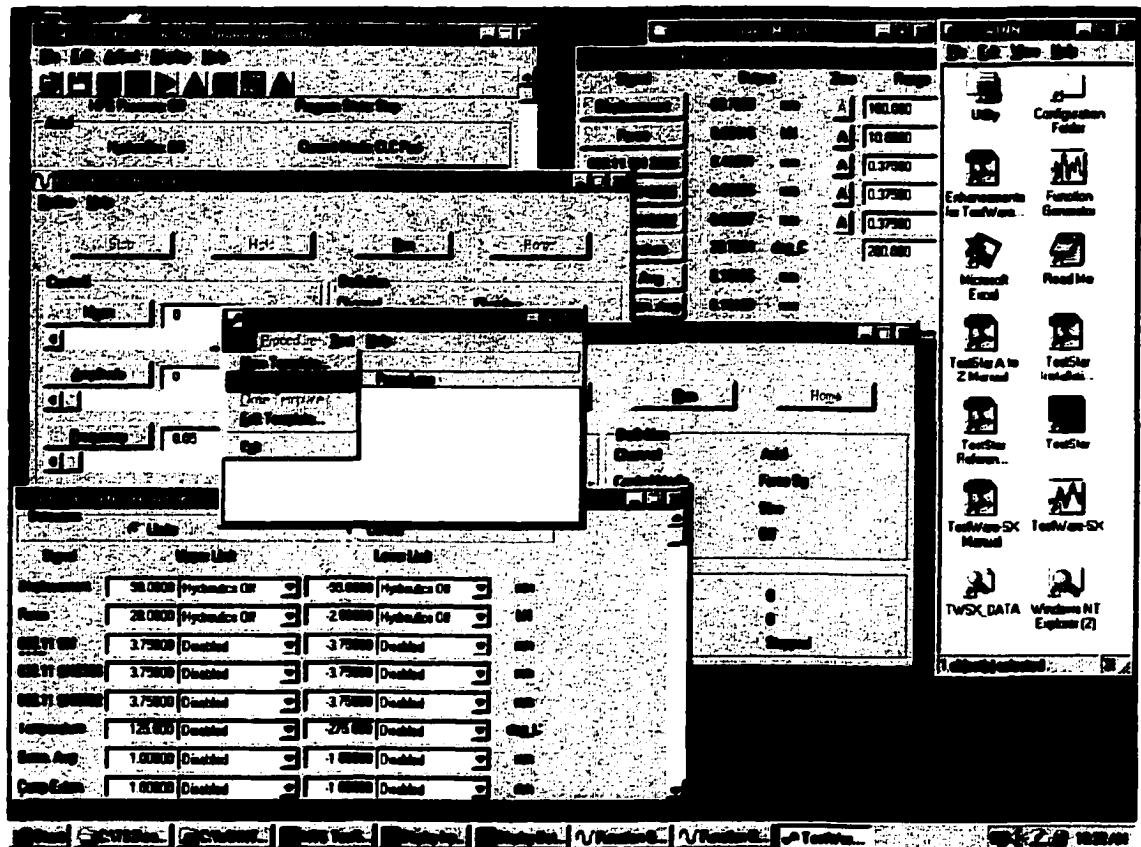


Figure A4.8 : Fenêtre de Testware-SX

32. Pour partir un essai, il faut sélectionner **Procédure** puis **Exécute procédure** (figure A4.9). Il faut ensuite lui donner un nom afin d'enregistrer les données de l'essai. Si aucun nom n'est donné, les données de l'essai seront perdues. Les données enregistrées sont en *.DAT transférable dans MS EXCEL ;

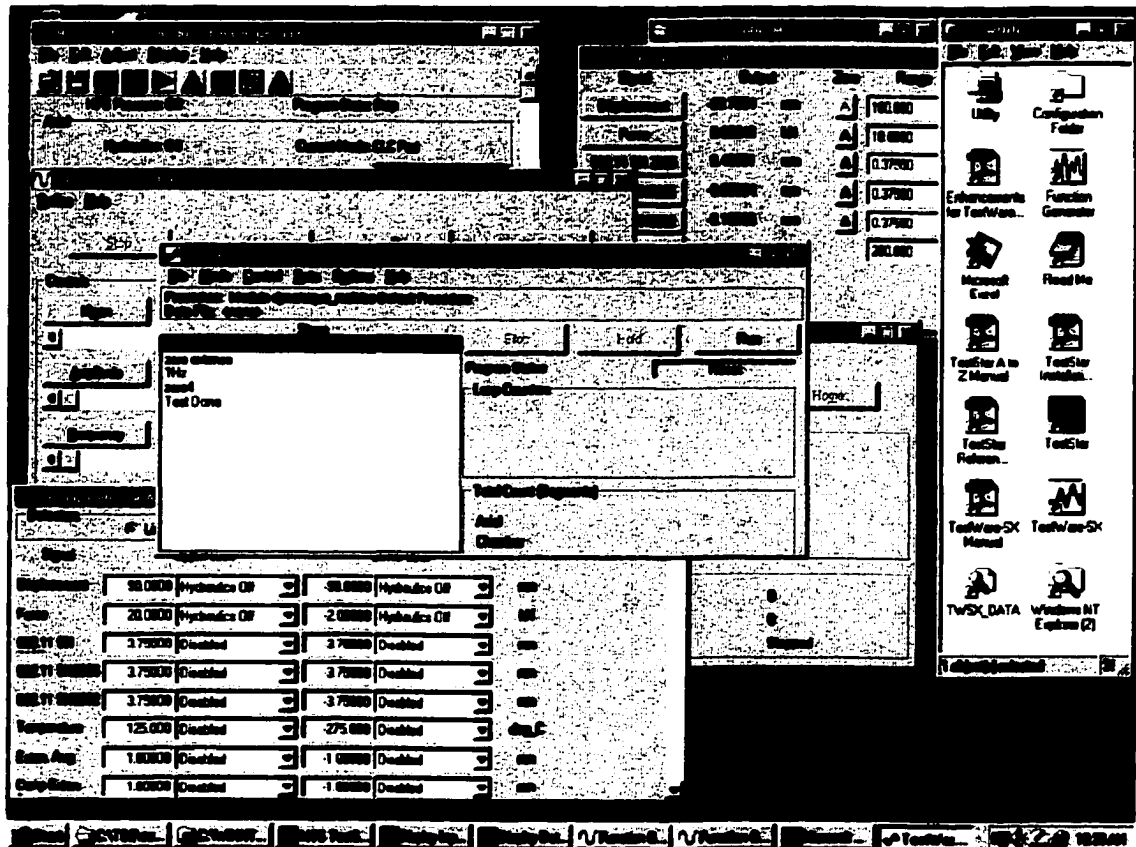


Figure A4.9 : La fenêtre pour démarrer une procédure

33. Avant de partir l'essai, il faut attendre que la température dans l'enceinte soit rétablie. De plus, il faut arrêter les générateurs de fonction qui peuvent entrer en conflit avec l'essai. Pour les essais de retrait empêché, il faut arrêter les deux générateurs tandis que pour l'essai de module complexe, seul le générateur de force doit être arrêté ;

34. Pour voir les valeurs de la force ou du déplacement ou de la température en temps réel, il faut ouvrir un **Display Scope** à partir de la fenêtre **MTS Teststar – Module dynamique maîtrise** (figure A4.10) à l'aide du menu déroulant ou des icônes

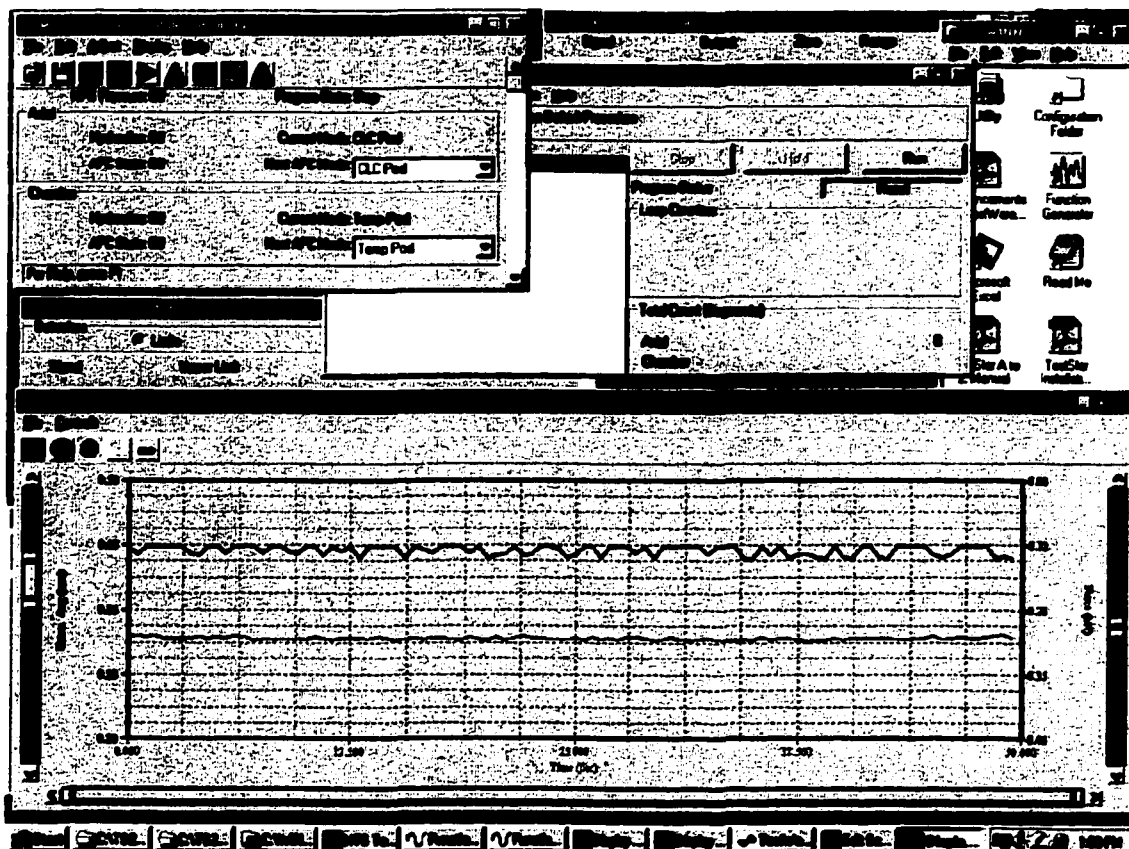


Figure A4.10 : Graphique des données de l'essai en temps réel

ANNEXE 5

Calcul des incertitudes

Pour calculer l'incertitude sur la valeur d'un module, il faut calculer l'incertitude sur chacun des termes qui compose ce dernier. Il faut donc vérifier l'incertitude sur la déformation et l'incertitude sur la contrainte.

L'incertitude est calculée avec la formule suivante :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (\text{équation A5.1})$$

où ΔE représente l'incertitude totale et $\Delta \sigma$ et $\Delta \varepsilon$ représente les incertitudes de la force et de la déformation. En fait, l'erreur relative du module est égale à la somme des erreurs relative de la contrainte et de la déformation.

Estimation de l'incertitude d'étalonnage d'un extensomètre

L'incertitude type est l'addition de trois incertitudes. La première est basé sur la répétition des observations ($\overline{\Delta l}$), la deuxième concerne le banc d'étalonnage (C_e) et la troisième se rapporte aux lectures (C_q).

L'incertitude type composé est donc :

$$u_c = (\overline{\Delta l} + C_e + C_q)^{1/2} \quad (\text{équation A5.2})$$

A) L'incertitude de la répétition des observations

Pour calculer l'incertitude type en relation avec la répétition des observations, il faut faire un tableau des valeurs lues en comparaison avec la valeur de référence que l'on s'attend de lire. Ensuite, il faut calculer l'étendue maximale. L'étendue maximale (w_{\max}) est la différence maximale entre une des lectures et la valeur de référence. Le tableau A5.1 donne un exemple d'un tableau des valeurs lues pour un extensomètre.

Dans le tableau I, l'étendue maximale est de 0,001 mm. Avec cette valeur, on peut calculer l'écart type max ($\mu_{\Delta i}$) avec la formule suivante :

$$\mu_{\Delta i} = \omega_{\max} / d_n \quad (\text{équation A5.3})$$

Où d_n est un coefficient qui change en fonction du nombre de lecture. Ici, puisqu'il y a trois lecture, $d_n = 1,69$. Ce qui donne un écart type max de 0,000592 mm.

Tableau A5.I

Exemple de valeurs lues lors de l'étalonnage d'un extensomètre

Extensomètre 2				
Référence	Lecture 1	Lecture 2	Lecture 3	Étendue maximale
0,0000	0,0000	0	0	0,0000
0,0020	0,0020	0,002	0,002	0,0000
0,0040	0,0040	0,0042	0,004	0,0002
0,0060	0,0060	0,006	0,006	0,0000
0,0080	0,0080	0,008	0,0085	0,0005
0,0100	0,0100	0,0105	0,01	0,0005
0,0160	0,0160	0,0165	0,0165	0,0005
0,0200	0,0200	0,021	0,0208	0,0010
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	0,0000
-0,0040	-0,0045	-0,0045	-0,0040	0,0005
-0,0060	-0,0065	-0,0065	-0,0060	0,0005
-0,0080	-0,0087	-0,0087	-0,0085	0,0070
-0,0100	-0,0106	-0,0106	-0,0100	0,0006
-0,0160	-0,0170	-0,0170	-0,0165	0,0010
-0,0200	-0,0207	-0,0210	-0,0205	0,0010
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

B) L'incertitude du banc d'étalonnage

L'incertitude du banc d'étalonnage est fournie par le fabricant de ce dernier. Dans notre cas, l'incertitude élargie du banc est de : $U_{ce} = 0,0002 \text{ mm}$. En partant de cette incertitude, on peut calculer l'incertitude type du banc avec la formule suivante :

$$u_{ce} = U_{ce} / k \quad (\text{équation A5.4})$$

où k est un coefficient qui prend la valeur de 2 lorsque le niveau de confiance est de 95%. L'incertitude type du banc est donc de $0,0001 \text{ mm}$.

C) Incertitude de lecture

L'incertitude de lecture est l'incertitude causée par la précision de la graduation de l'appareil d'étalonnage. Le banc d'étalonnage MTS est gradué au $0,002 \text{ mm}$. On considère, dans ce cas précis, être capable de lire au $\frac{1}{4}$ de la graduation, donc au $0,0005 \text{ mm}$.

En prenant pour acquis que l'incertitude suit une loi rectangulaire, l'incertitude type a pour valeur :

$$U_{cq} = q / 2\sqrt{3} \quad (\text{équation A5.5})$$

Où q est la plus petite lecture que l'on peut faire. On obtient une incertitude type de $0,000144 \text{ mm}$.

Incertitude élargie

Avant de pouvoir calculer l'incertitude élargie, il faut calculer l'incertitude type composée (u_c) avec l'équation A5.2.

$$u_c = ((5,92^2 + 1,00^2 + 1,44^2) \cdot 10^{-4})^{1/2} = 0,000617 \text{ mm}$$

L'incertitude élargie se calcule simplement en multipliant l'incertitude type composé par le facteur k qui est de deux puisqu'on utilise un niveau de confiance de 95%.

$$U = 0,00123 \text{ mm}$$

L'incertitude sur la contrainte

Dans la mesure de l'incertitude de la contrainte, il faut tenir compte de l'incertitude de la mesure de l'aire de l'échantillon et l'incertitude de la mesure de la force. Commençons par l'incertitude sur l'aire.

Pour la mesure du diamètre des échantillon, un vernier électronique précis au 1 μm a été utilisé. La valeur de 1 μm est considéré comme étant la graduation du vernier. Cette valeur de 1 μm donne une incertitude de lecture de $\pm 0,289 \mu\text{m}$. Chaque diamètre a été mesurée trois fois et l'écart type est aux alentours de 0,011 mm pour un diamètre d'environ 79 mm. En utilisant le même principe que montré précédemment, on trouve une incertitude de mesure de $\pm 11,004 \mu\text{m}$.

L'incertitude sur la lecture du diamètre des échantillons n'est pas l'incertitude sur l'aire. Par définition, si une grandeur physique G est lié à un paramètres x par la relation $G=f(x)$, alors l'erreur peut s'écrire:

$$\Delta G = |f'(x)| \Delta x \quad (\text{équation A5.6})$$

où ΔG représente l'incertitude absolue sur l'aire et Δx l'incertitude absolue sur la mesure. Dans le cas de l'incertitude sur l'aire d'une surface ronde, elle se calcule avec :

$$\Delta A = \left(\frac{\pi}{2}\right) d \Delta d \quad (\text{équation A5.7})$$

où ΔA représente l'incertitude absolue sur l'aire, Δx l'incertitude absolue sur la mesure du diamètre et d le diamètre. Pour un échantillon de diamètre moyen de 79,248 mm l'incertitude de mesure sur l'aire est de $\pm 1,37 \text{ mm}^2$.

L'incertitude de la mesure de la force se calcule comme l'incertitude sur la mesure du diamètre. Pour une force moyenne mesurée de 0,0207 kN, avec un écart-type de 0,00035 kN et avec une graduation au 1 N sur l'anneau de force, on obtient une incertitude de mesure de 0,454 N.

L'incertitude de mesure de la contrainte se calcule en additionnant les incertitudes relatives de l'aire et de la force (équation A5.8). Par la suite, il est possible de trouver l'incertitude élargie de la contrainte (équation A5.4).

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta F}{F} \quad (\text{équation A5.8})$$

En prenant :

$$\Delta \sigma / \sigma = 0,0222$$

L'incertitude relative totale (pour une déformation contrôlée de 30 μdef avec des extensomètres de 100 mm) sur la mesure de la norme du module complexe se calcule avec l'équation 1 et donne :

$$\frac{\Delta E}{E} = 0,0222 + \frac{0,00125}{0,030} = 6,39\%$$

L'incertitude totale relative sur les mesures de module complexe est donc de 6,39%.

ANNEXE 6

Paramètres d'asservissements

.

Paramètres d'asservissement pour les essais de module complexe à la presse MTS

Enrobé EG-10A (10% de filler)	Temp.	-30°C			-15°C			0°C		15°C				30°C		
	Fréq. (Hz)	5	1	0,3 et -	15 à 10	5	1 et -	15 et 10	5 et -	15	10	5	1 et -	20	15 et 10	5 et -
	P	4000	2600	1500	5500	5000	2700	2700	2600	3700	3200	1500	1300	1950	1600	1000
	I	405	260	150	580	500	270	270	260	375	320	150	130	160	160	160
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Enrobé EG-10B (7% de filler)	Temp.	-30°C			-15°C		0°C			15°C				30°C
	Fréq. (Hz)	5	1	0,3 et -	15 à 5	1 et -	15 et 10	5	1 et -	20	15	10	5 et -	15 et -
	P	4400	3900	2850	4500	2000	4600	3250	2500	3900	3150	4900	4400	1100
	I	440	390	285	560	562	500	325	250	500	500	500	500	110
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	0	0,7	0,7	1	1	1	4,5	0	0	0	0

ANNEXE 7

Tableaux des résultats des essais de mesure du module complexe pour les enrobés EG-10A et EG-10B

Ensemble BG-16A

Echelle	Température 30°C				Température 18°C				Température 0°C				Température -18°C				Température -30°C			
	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11
0.05	175	83	78	164	331	42	324	221	3186	33	3880	1720	3324				14164			
0.1	202	43	148	138	603	47	411	441	4250	28	4048	2243	18848							
0.3	247	27	309	158	1616	45	1039	1038	8186	21	7828	3005	18240							
1	448	10	458	81	3485				8995				23518							
10	860	13	838	193	4852				14247				23708							
18	1119	8	1108	160	4820				14831				26093							
20	1288	6	1281	135	5797				14482				24191							

Echelle	Température 30°C				Température 18°C				Température 0°C				Température -18°C				Température -30°C			
	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11
0.05	208	25	183	101	472	23	324	322	5478	33	2515	1883	12383				31884			
0.1	208	30	180	104	643	48	447	483	5141	28	4486	2482	18485				30029			
0.3	276	34	228	154	868	47	660	708	7082	25	8400	2885	18235				30541			
1	389	42	252	227	1218	45	1088	1088	8690	21	8113	3114	18733				28925			
10	824				3685				13044				23497				28068			
18					4871				13240				13133							
20					5070								28472							

Echelle	Température 30°C				Température 18°C				Température 0°C				Température -18°C				Température -30°C			
	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11	Module	Phase	E1	E11
0.05	181	47.00	131	78	403	23.00	326	272	3338	33.00	2787	1817	8764				23083			
0.1	208	38.80	184	121	823	48.80	428	452	4444	28.00	4271	2388	18212				30028			
0.3	251	33.50	209	138	881	47.00	608	632	6743	25.00	6111	2880	18813				30541			
1	423	18.50	281	182	1553	45.00	1063	1063	1358	21.00	7671	3060	18437				28925			
10	862	13.00	838	193	4288				13648				23837				28068			
18	1119	8.00	1108	160	4849				13846				18108							
20	1288	6.00	1281	135	5434				14482				25332							

Note: Les modules présentés dans ce tableau sont les normes des modules complets.

Enrobés EG-10B

#1	temperature 30°C				temperature 0°C				temperature -15°C			
	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
0.03	83	26.84	81	48	3812	31.23	3345	2028	18098	13.03	15882	3829
0.1	120	32.48	101	84	5886	27.07	5045	2578	18510	11.1	18164	3584
0.3	151	37.77	119	92	7594	13.12	7398	1724	20770	9.55	20482	3448
1	185	23.49	170	74	10018	19.15	9484	3288	23194	7.87	22976	3178
5	482	31.33	412	251	13527	14.88	13073	3474	28388	8.07	28218	2788
10	820	49	538	819	14832	12.84	14481	3288	27473	5.01	27388	2399
15	999	50.11	841	787	15960	14.07	15481	3880	28421	4.72	28325	2339

#2	temperature 30C				temperature 15C				temperature 0C				temperature -15C				temperature -30C			
	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
0.03	89	11.28	87	17	283	45.12	200	201	3288	33.68	2743	1828	15488	13.27	15084	3857	31327	3.28	31278	1781
0.1	116	31.44	99	81	514	48.58	353	373	4894	29.89	4282	2424	17818	11.54	17458	3585	32618	3.14	32589	1787
0.3	153	34.47	128	87	890	45.88	820	839	8715	25.43	8084	2883	20182	10	19875	3505	33348	2.88	33313	1548
1	245	41.85	182	183	1827	44.11	1188	1132	9113	21.35	8488	3318	22387	8.08	22188	3138	34837	1.88	34818	1142
5	490	47.38	332	380	3371	37.9	2880	2071	12734	18.71	12188	3881	25839	8.23	25488	2782	34528	1.84	34508	1189
10	781	48.89	498	584	4411	34	3857	2487	14178	14.88	13712	3582	28880	4.84	28772	2173	-	-	-	-
15	942	48.78	621	708	5148	32.1	4389	2735	14944	13.7	14519	3839	27331	4.55	27245	2188	-	-	-	-

#3	temperature 30°C				temperature 15°C				temperature 0°C				temperature -15°C				temperature -30°C			
	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11	module	phase (°)	E1	E11
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
0.03	153	28.08	137	87	348	41.81	288	230	3833	32.12	3331	2081	15882	13.48	15444	3702	32288	3.38	32213	1803
0.1	208	29.81	180	104	588	43.84	408	384	5708	28.45	5020	2720	18285	11.51	17927	3851	33478	2.48	33445	1449
0.3	258	34.83	212	147	929	45.37	853	881	7882	24.21	8988	3142	20450	9.85	20181	3428	34487	2.2	34432	1323
1	357	39.84	274	229	1854	44.07	1188	1150	10245	20.38	9804	3588	22974	8.08	22747	3221	35289	1.8	35275	885
5	871	46.08	485	483	3388	37.55	2889	2051	14050	15.77	13521	3818	25851	8.47	25888	2913	38311	1.35	38301	885
10	821	48.88	630	872	4484	32.85	3748	2428	15758	14.42	15282	3824	27184	5.09	27047	2409	-	-	-	-
15	1112	48.85	759	813	5184	32.85	4350	2820	18481	12.78	18072	3849	27885	5.97	27358	2881	-	-	-	-

Synthèse	temperature 30°C				temperature 15°C				temperature 0°C				temperature -15°C				temperature -30°C			
	Module	Phase (°)	E1	E11	Module	Phase (°)	E1	E11	Module	Phase (°)	E1	E11	Module	Phase (°)	E1	E11	Module	Phase (°)	E1	E11
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
0.03	112	22.33	102	44	318	43.37	228	215	3714	32.34	3140	1982	15825	13.28	15403	3830	31788	3.32	31748	1842
0.1	148	31.27	127	78	541	45.28	381	384	5423	28.40	4772	2574	18288	11.38	17850	3593	33047	2.81	33007	1818
0.3	187	35.82	153	109	910	45.63	838	850	7324	20.92	8818	2583	20487	9.73	20173	3459	33803	2.43	33872	1435
1	282	35.09	209	155	1841	44.09	1178	1141	9792	20.29	9185	3391	22852	8.00	22829	3179	34883	1.75	34847	1084
5	548	41.59	403	385	3389	37.73	2884	2081	13437	15.79	12830	3851	25852	8.28	25787	2828	35419	1.85	35404	1012
10	831	48.19	554	818	4438	33.48	3701	2447	14822	13.98	14478	3804	27182	4.91	27082	2327	-	-	-	-
15	1018	48.81	674	782	5185	32.53	4355	2777	15785	13.52	15357	3889	27752	5.08	27842	2458	-	-	-	-

Note: Les modules présentés dans ce tableau sont les normes des modules complexes
 Les modules sont calculés à partir des contraintes et déformations obtenues à l'aide de la méthode des moindres carrés

ANNEXE 8

Méthodologie pour l'essai de TSRSTS et méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe

La méthodologie pour l'essai TSRSTS

La méthodologie pour l'essai de TSRSTS est conçue pour l'appareillage disponible au LUCREB.

1. La préparation des éprouvettes (section 4.4.1)

- Confection et compactage de l'enrobé;
- Carottage et surfacage des éprouvettes;
 - Des éprouvettes de 60 mm de diamètre et de 250 mm de longueur sont nécessaires pour cet essai;
- Collage des casques;
 - L'utilisation de casques en aluminium est préférable aux casques en acier;
 - Les casques sont collés parfaitement parallèles l'un à l'autre grâce au banc de collage;
 - Installation de trois extensomètres sur l'éprouvettes à 120° l'un de l'autre;
 - Les extensomètres sont placés à mi-hauteur de l'éprouvette;

2. Installation de l'éprouvette dans l'enceinte thermique (section 4.4.2)

- S'assurer qu'il n'y a pas de contraintes induites au sein de l'éprouvette en cours de montage (torsion; flexion);
 - Deux tiges filetées solidarisent les deux casques ensemble;
 - L'éprouvette est fixée dans la presse que par son casque supérieur qui est vissé solidement dans le système d'attache supérieur relié au vérin;
 - L'éprouvette ne doit pas être en contact avec le système d'attache inférieur de la presse;
 - L'installation de l'éprouvette se fait bien lorsque l'asservissement est en mode de déplacement;

- S'assurer que les extensomètres sont toujours placés au même endroit à la surface de l'éprouvette par rapport au système de ventilation d'un essai à l'autre;

3. Période de conditionnement (section 4.4.2.5)

- 4 heures de conditionnement à 5°C;
- Durant le conditionnement, l'éprouvette est toujours seulement en contact avec le système d'attache supérieur de la presse : déplacement longitudinal libre;

4. Fixation de l'éprouvette sur le système d'attache inférieur (section 4.4.2.5)

- Asservissement de la presse en mode de contrôle de force;
- Visser solidement le casque inférieur dans le système d'attache inférieur, relié à la cellule de charge;
- Enlever les goupilles de sécurité des extensomètres puis faire une mise à zéro de l'élongation;
- Attendre la stabilisation de la température à 5°C avant de passer à l'étape suivante;

5. Descente en température contrôlé (section 4.4.2.5)

- Un taux de refroidissement de 10°C/h;
- Le retrait thermique est empêché en imposant une longueur fixe à l'éprouvette;
- Faire l'acquisition de la température, de la force et du temps en cours d'essai;

6. Analyse des résultats (section 5.3.1)

- Tracer la relation contrainte-température;
- Évaluer la contrainte et la température à la rupture;
- Évaluer le T_g;
- Évaluer la pente de la relation contrainte-température en

La méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe

La méthodologie pour l'essai de mesure du module complexe est conçu pour l'appareillage disponible au LUCREB.

1. Limite de linéarité du comportement viscoélastique

- Avant d'effectuer les essais de mesure des modules complexes, on doit connaître la limite de linéarité du comportement viscoélastique des enrobés étudiés (voir section 5.2.6);

2. La préparation des éprouvettes (section 4.4.1)

- Confection et compactage de l'enrobé;
- Carottage et surfacage des éprouvettes;
 - Des éprouvettes de 80 mm de diamètre et 250mm de longueur sont nécessaires pour cet essai;
- Collage des casques;
 - L'utilisation de casques en aluminium est préférable aux casques en acier;
 - Les casques sont collés parfaitement parallèle l'un à l'autre grâce au banc de collage;
 - Installation de trois extensomètres sur l'éprouvettes à 120° l'un de l'autre;
 - Les extensomètres sont placé à mi-hauteur de l'éprouvette;

3. Installation de l'éprouvette dans l'enceinte thermique (section 4.4.2)

- S'assurer qu'il n'y a pas de contraintes induites au sein de l'éprouvette;
 - Deux tiges filetées solidarisent les deux casques ensemble;
 - L'éprouvette est fixée dans la presse que par son casque supérieur qui est vissée solidement dans le système d'attache supérieur;
 - L'éprouvette ne doit pas être en contact avec le système d'attache inférieur de la presse;
 - L'installation de l'éprouvette se fait bien lorsque l'asservissement est en mode de déplacement;

- S'assurer que les extensomètres sont toujours placés au même endroit à la surface de l'éprouvette par rapport au système de ventilation d'un essai à l'autre;

4. Période de conditionnement (section 4.4.3.3)

- 4 heures de conditionnement à la température d'essai;
 - La première température d'essai est la température la plus basse, soit 5°C;
- Durant le conditionnement, l'éprouvette est toujours seulement en contact avec le système d'attache supérieur de la presse;

5. Fixation de l'éprouvette sur le système d'attache inférieur (section 4.4.3.3)

- Asservissement de la presse en mode de contrôle de force;
- Visser solidement le casque inférieur dans le système d'attache inférieur;
- Enlever les goupilles de sécurité des extensomètres puis faire une mise à zéro de l'élongation;
- Attendre la stabilisation de la température à la température de conditionnement avant de passer à l'étape suivante;

6. Mesure de la limite de linéarité (section 5.2.6)

- Faire un essai en déformation contrôlé : faire environ 45 cycles sinusoïdal centré sur zéro;
- Pour chaque température d'essai (5, 22 et 40°C) faire un essai avec une déformation imposée de 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 μ def.
- L'essai doit être effectué à deux fréquences, soit 5 et 1 Hz. L'essai à fréquence plus élevée est effectué en premier;
- Une fois tous les essais à une même température terminés, faire un nouveau conditionnement de l'éprouvette à une deuxième température puis faire une nouvelle série d'essai;
- Lors des essais une acquisition des données complète doit être effectuée. Pour ce faire, le temps, la déformation mesurée par chacun des extensomètres et la force doivent être enregistrés à une fréquence permettant d'avoir une centaine de points par cycle;

- Calculer le rapport entre la norme du module complexe à une déformation donnée et la norme du module complexe à 30 μdef ;
- Dessiner la relation entre le rapport calculé précédemment et la déformation. À 30 μdef , le rapport est de 1 et se rapport décroît avec l'augmentation de la déformation; c'est la perte de linéarité. On peut considérer qu'on demeure dans le domaine linéaire jusqu'à un rapport de 0,8, mais 0,9 est préférable;
- Choisir la déformation qui sera utilisée lors de la série d'essai de mesure du module complexe;

7. Mesure du module complexe

- Faire les étapes 2, 3, 4 et 5 avec une nouvelle éprouvette du même enrobé. Le seul changement est au niveau de la température de conditionnement. Les températures de conditionnement sont, dans l'ordre, -30, -15, 0, 15 et 30 °C;

8. Début d'une série d'essai (section 4.4.3.3)

- Faire un essai cyclique en déformation contrôlée avec l'amplitude trouvée précédemment. Il s'agit d'un essai à signal sinusoïdal autour de zéro comme celui effectué pour mesurer la limite de linéarité;
- Les fréquences d'essais utilisées sont dans l'ordre : 15, 10, 5, 1, 0,3, 0,1 et 0,03 Hz;
- Faire environ 45 cycles à chacune des fréquences;
- Faire les essais à toutes les fréquences avant de changer de température;
- Lors des essais une acquisition des données complète doit être effectuée. Pour ce faire, le temps, la déformation mesurée par chacun des extensomètres et la force doivent être enregistrés à une fréquence permettant d'avoir une centaine de points par cycle;

9. Vérification de l'homogénéité du champ de contrainte (section 5.2.2.1)

- Vérifier pour chacun des essais si la déformation mesurée par chacun des extensomètres est homogène. Si ce n'est pas le cas, trouver la source de l'erreur puis reprendre l'essai;

10. Analyse des résultats (section 5.4.1)

- À l'aide de la méthode des moindres carrés, calculer la norme du module complexe ainsi que l'angle de phase pour chacun des essais;
- Inscrire les résultats dans un plan Cole-Cole et dans un espace de Black;
- Utilisation de la relation Huet-Sayegh pour avoir une fonction analytique afin de pouvoir calculer la norme du module complexe pour des fréquences et des températures qui n'ont pas été testées.

BIBLIOGRAPHIE

AASHTO. (2001). *Hot mix asphalt paving handbook*

Aïtcin P-C., Jolicoeur G., Mercier M. (1992). *Technologie des granulats*, deuxième édition

Aklonis J., MacKnight W. (1983). *Introduction to polymer viscoelasticity*, Second edition

Anderson K., Christison T., Johnston C. (1999). *Low temperature pavement performance : An evaluation using C-SHRP test road data*. Association des transports du Canada

Anderson D., Bahia H., Dongre R. (1992). *Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and its Importance to Pavement Performance*. Asphalt mixture performance. ASTM STP 1147

Anderson D., Dongre R., Christensen III D., Dukatz E. (1992). *Effects of minus No. 200 sized aggregates on fracture behavior of dense-graded hot-mix asphalt*. Asphalt mixture performance. ASTM STP 1147

Asphalt Institute. (1981). *Design Techniques to Minimize Low-Temperature Asphalt Pavement Transverse Cracking*. A state of the Art Report. RR-81-1

Austroroads (1999). *Air void in asphalt*. Pavement work tips #17

Bahia H., Anderson D.A. (1993). *Glass transition behavior and physical hardening of asphalt binders*. Asphalt Paving Technology. Vol #62. p.93-125

Beer F.P., Johnston E.R. (1998). *Vector Mechanics for Engineers, Statics*. Third SI metric edition

Bonniot F. (1993). *Propriétés rhéologiques des bitumes-polymères*. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique. Montréal

Boutin G., Lupien C. (1999). *Thermal cracking of asphalt pavement*. Canadian Technical Asphalt Association Proceedings. 44th Annual conference. Vol.# XLIV. p.157-173

Brown E., Haddock J., Crawford C. (1996). *Investigation of stone matrix asphalt mortars*. Transportation Research record. Vol # 1530. p. 95-102

Brown E.R., Foo K.Y. (1991). *Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results (ASTM D4123)*. NCAT

Callister W.D. (2000). *Materials Science and Engineering, An Introduction*. Fifth Edition

Carter A., Perraton D. (2002). *La mesure du module complexe des enrobés bitumineux*. 2^e conférence spécialisée en génie des matériaux de la SCGC. Montréal

Côté A.-G. (1983). *Résistance des matériaux*. Université Laval. Notes de cours. Tome III.

Chevalier R., Conté R., Labrie Y., Landry F., Nadeau A. (1978). *Éléments de métrologie*

C-SHRP. (2000). *Superpave et l'hiver au Canada : Rendement à basse température des tronçons routiers expérimentaux du C-SHRP*. Bulletin technique No.19

Cupo-Pagano M., D'Andrea A., Cantisani G. (1997). *The role of filler in bituminous mastics and concretes*. Mechanical Tests for Bituminous Materials. RILEM

De la Roche C. (1996). *Module de rigidité et complexe en fatigue des enrobés bitumineux*. *Expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse*. E.C. Paris

Darve F. (1987). *Manuel de rhéologie des géomatériaux*. Paris : Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées

Di Benedetto H. (2002). *Communication personnelle*

Di Benedetto H. (1998a). *Chapitre 5 du cours « voies de circulation II » de l'EPF de Lausanne (suisse)*

Di Benedetto H. (1998b). *Modélisation: écart entre état des connaissances et applications*. Journée LAVOC

Di Benedetto H., de La Roche C. (1998). *State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM. report #17

Di Benedetto H., Neifar M. (1997). *Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobé bitumineux avec et sans chargement mécanique*. Mechanical Tests for Bituminous Materials. p. 421-428

Di Benedetto H., Soltani A.A., Chaverot P. (1996). *Fatigue damage for bituminous mixtures: A pertinent approach*. Asphalt paving technology. Vol #65. p. 142-157

Doubbaneh E. (1995). *Comportement mécanique des enrobés bitumineux des « petites » aux « grande » déformations*. Thèse de doctorat. INSA Lyon

Doucet F., Savard Y., Lupien C., Langlois P. (2000). *Caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux*. Rapport de recherche contractuelle pour le MTQ. No 1220-96-RD01

Doucet F., Savard Y., Lupien C., Langlois P. (1999). *Stiffness and fatigue resistance characterization of asphalt mixes used at the C-SHRP experimental site on highway 10.* CTAA. Vol # XLIV. p.89-113

Durand J.-M., Doré G. (1993). *Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles.* Ministère des transport du Québec

Fabb T.R.J. (1974). *The influence of mix composition, binder properties and cooling rate on asphalt cracking at low temperature.* Asphalt paving technology. Vol. #43. p.285-319

Faucont-Dumont S. (2002). *Communication personnelle.* Laboratoire Eurovia, France

Gubler R., Liu Y., Anderson D.A., Partl M.N. (1998). *Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means.* Asphalt paving technology. Vol #68. p. 284-304

Haas R., Meyer F., Assaf G., Lee H. (1987). *A comprehensive study of cold climate airport pavement cracking.* Asphalt paving technology. Vol. #56. p.198-217

Haddock J.E. (1998). *Characterization of stone matrix asphalt mortars.* Auburn University, Alabama

Harris B.M., Stuart K.D. (1995). *Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt.* Asphalt Paving Technology. Vol #64. p.54-87

Harvey J., Tsai B.W. (1996). *Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness.* Transportation Research record. Vol # 1543. p. 38-45

Hubert A.G., Scherocman A.J., (1999). *Superpave and Westrack, Did they perform as expected?.* CTAA. Vol # XLIV. p.253-279

Hui J.C.T., Morrison G.R., Hesp S.A.M. (1994). *Improved low-temperature fracture performance for rubber-modified asphalt binders.* Transportation research record. Vol. #1436. p.83-87

Hunter R.N. (2000). *Asphalts in road construction*

Isacsson U., Vinson T.S., Zeng H. (1997). *The influence of material factors on the low temperature cracking of asphalt.* Mechanical Tests for Bituminous Materials. p. 375-382

Ishai I., Craus J. (1996). *Effects of some aggregate and filler characteristics on behavior and durability of asphalt paving mixtures.* Transportation Research record. Vol # 1530. P. 75-85

Jung D., Vinson T.S. (1993). *Low temperature resistance of asphalt concrete mixtures.* Asphalt Paving Technology. Vol #62. P.54-87

Jung D.H., Vinson T.S. (1994). *Low-temperature cracking : test selection*. Strategic Highway Research Program. SHRP-A-400

Kavussi A., Hicks R.G. (1997). *Properties of Bituminous mixtures containing different filler*. Asphalt Paving Technology. p.153-184

Kennedy T., Huber G., Harrigan E., Cominsky R., Hughes C., Von Quintus H., Moulthrop J. (1994). *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) : The product of the SHRP asphalt research program*. SHRP-A-410

Kim N., Roque R., Hiltunen D. (1994). *Effect of moisture on low-temperature asphalt mixture properties and thermal-cracking performance of pavements*. Transportation research record. Vol. #1454. p.82-88

Kurz W., Mercier J.P., Zambelli G. (1989). *Introduction à la science des matériaux*. Traité des matériaux. Presses polytechniques romandes. Vol #1

Langlois P., Leclerc AM., Tremblay G., Tourangeau G., (2001). *Enrobés, Introduction, bitumes granulats, enrobés*. MTQ, Université de Sherbrooke. Cours GCI-718

Laveissière D., Petit C. (1998). *Modélisation de la fissuration par fatigue de chaussées préfissurées sous sollicitations thermiques*. Revue Générale des Routes et Aéroports. Vol #760. Mars 1998. p.49-52

Lesueur D., Planque L. (2000). *Les propriétés rhéologiques du bitume*. La formation continue de l'École des Ponts

Migliori F., Daligault A., Molinengo J.-C. (1996). *Étude du comportement à basse température des bitumes routiers. Application du Bending Beam Rheometer*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées. Vol #202. p. 11-24

MFQ (Mouvement Français pour la qualité). (1995). *Guide pour la détermination des incertitudes de mesure*

Mogawer W., Stuart K. (1996). *Effects of mineral fillers on properties of Stone matrix asphalt mixtures*. Transportation Research record. Vol # 1530. p. 86-94

Moran L. (1998). *Salute to the Canadian asphalt industry*. Asphalt Industry. p.8-15

Moughabghab Z. (1994). *Étude de l'orniérage, de la fissuration thermique et du désenrobage dans les enrobés bitumineux*. Université Laval

MTS (1998). *Model 790.00 TestStar[™] II Software Reference*. For software version 4.0D

Neifar M. (1997). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux: experimentation et modélisation*. Thèse de doctorat, ENTPE

Omega (1998). *The temperature Handbook*. 21st Century preview edition

Perraton D., Carter A., Tremblay D., Langlois P. (2001). *Rheological properties, thermal cracking and rutting resistance of Stone Matrix Asphalt*. CTAA proceeding.

Roy J-P., Blin-Lacroix J-L. (1998). *Le dictionnaire professionnel du BTP*. Eyrolles

Salençon J. (1983). *Viscoélasticité. Cours de calcul des structures anélastiques*. Presse ENPC

Shackelford J. (2000). *Introduction to materials science for engineers*. Fifth edition. Prentice Hall

Shashidhar N., Needham S.P., Chollar B.H., Romero P. (1998). *Prediction of the performance of mineral fillers in Stone Matrix Asphalt*. Asphalt Paving Technology

Shell Bitume (1991). *Bitumes, techniques et utilisations*

Soltani A. (1998). *Comportement en fatigue des enrobés bitumineux*. Thèse de doctorat. INSA de Lyon

Tayebali A., Tsai B., Monismith C. (1994). *Stiffness of Asphalt-Aggregate Mixes*. SHRP-A-388

Timoshenko S.P. (1936). *Theory of Elastic Stability*

Tremblay D. (2001). *Influence des différents paramètres de formulation et optimisation des enrobés à matrice de pierre*. Mémoire de maîtrise. École de technologie supérieure

White M.A. (1999). *Properties of materials*. Oxford University Press

Young F., Mindess S., Gray R., Bentur A. (1998). *The science and technology of civil engineering materials*. Prentice Hall

Yusuf A. Mehta, Shelley A. Stoffels and D.W. Christensen (1999). *Determination of thermal contraction of asphalt concrete using indirect tensile test hardware*. Asphalt paving technology. Vol. #68. p.349-367